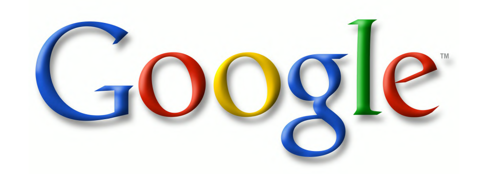
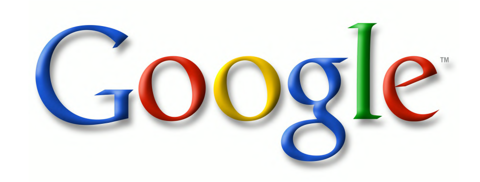
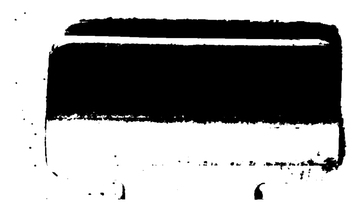

Google






Ex-libris
Charles Atwood
Kofoid



L'ÉVOLUTION DE L'ASTRONOMIE AU XIXe SIÈCLE

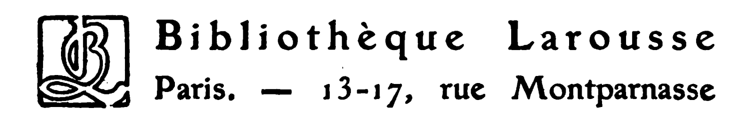
L'ÉVOLUTION DE L'ASTRONOMIE AU XIXe SIÈCLE

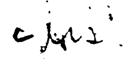
Pages choisies des grands astronomes

par Pierre BUSCO
licencié ès lettres et ès sciences



63 gravures dont 16 hors texte


Bibliothèque Larousse
Paris. — 13-17, rue Montparnasse



INTRODUCTION

Si l'on essayait de déterminer l'ensemble de connaissances qui ont le plus contribué à fixer notre idée moderne de la Science, comme suite d'idées précises et liées entre elles, c'est sans doute à l'*Astronomie* qu'il conviendrait d'accorder la première place.

Grâce à l'extrême simplicité, au moins apparente, des mouvements qu'elle étudie, grâce aussi à l'éloignement et par suite à la petitesse pour nous des mobiles observés, qui sont l'image sensible la plus rigoureuse de cette fiction de l'esprit qu'on appelle le point mathématique, l'Astronomie se trouvait naturellement indiquée pour montrer à l'homme la valeur expérimentale de ses conceptions géométriques. En même temps elle lui laissait entrevoir la possibilité d'une science rigoureuse de la Nature, que la trop grande complexité des faits physiques et biologiques aurait pu faire révoquer en doute à une intelligence encore mal assurée. Certes, puisque la science est avant tout l'expression d'un pouvoir créateur de la Raison humaine, bien plutôt qu'un simple enregistrement passif de phénomènes par l'esprit, des sciences telles que la Physique et la Chimie auraient toujours fini par apparaître, même en supposant l'Astronomie impossible. Mais on peut affirmer qu'elles se seraient développées beaucoup plus tard et plus timidement, puisqu'elles n'auraient pas eu, pour ainsi dire tout faits par la Nature, une méthode et un type de raisonnement expérimental pour les guider.

Citons, à ce sujet, les belles réflexions d'un savant moderne, M. H. Poincaré (1) :

« ..... C'est l'Astronomie qui nous a appris qu'il y a des

(1) H. Poincaré. *La Valeur de la science.* Paris, Flammarion édit., 1906.

lois. Les Chaldéens, qui les premiers ont regardé le ciel avec quelque attention, ont bien vu que cette multitude de points lumineux n'est pas une foule confuse errant à l'aventure, mais plutôt une armée disciplinée. Sans doute les règles de cette discipline leur échappaient, mais le spectacle harmonieux de la nuit étoilée suffisait pour leur donner l'impression de la régularité, et c'était déjà beaucoup. Ces règles, d'ailleurs, Hipparque, Ptolémée, Copernic, Képler les ont discernées l'une après l'autre, et enfin il est inutile de rappeler que c'est Newton qui a énoncé la plus ancienne, la plus précise, la plus simple, la plus générale de toutes les lois naturelles.

« Et, alors, avertis par cet exemple, nous avons mieux regardé notre petit monde terrestre et, sous le désordre apparent, là aussi nous avons retrouvé l'harmonie que l'étude du ciel nous avait fait connaître. Lui aussi est régulier, lui aussi obéit à des lois immuables, mais elles sont plus compliquées, en conflit apparent les unes avec les autres, et un œil qui n'aurait pas été accoutumé à d'autres spectacles n'y aurait vu que le chaos et le règne du hasard ou du caprice.

« ..... Combien de fois les physiciens, rebutés par tant d'échecs, ne se seraient-ils pas laissé aller au découragement s'ils n'avaient eu, pour soutenir leur confiance, l'exemple éclatant du succès des astronomes ! Ce succès leur montrait que la Nature obéit à des lois ; il ne leur restait plus qu'à savoir à quelles lois ; pour cela, ils n'avaient besoin que de patience, et ils avaient le droit de demander que les sceptiques leur fissent crédit.

« Ce n'est pas tout : l'Astronomie ne nous a pas appris seulement qu'il y a des lois, mais que ces lois sont inéluctables, qu'on ne transige pas avec elles ; combien de temps nous aurait-il fallu pour le comprendre, si nous n'avions connu que le monde terrestre, où chaque force élémentaire nous apparaît toujours comme en lutte avec d'autres forces ? Elle nous a appris que les lois sont infiniment précises, et que si celles que nous énonçons sont approximatives, c'est parce que nous les connaissons mal.

« ..... Mais ces lois ne sont pas locales, variables d'un

point à un autre, comme celles que font les hommes; ce qui est la vérité dans un coin de l'univers, sur notre globe, par exemple, ou dans notre petit système solaire, ne va-t-il pas devenir l'erreur un peu plus loin? Et alors ne pourra-t-on pas se demander si les lois dépendant de l'espace ne dépendent pas aussi du temps, si elles ne sont pas de simples habitudes, transitoires par conséquent et éphémères? C'est encore l'Astronomie qui va répondre à cette question. Regardons les étoiles doubles; toutes décrivent des coniques; ainsi, si loin que porte le télescope, il n'atteint pas les limites du domaine qui obéit à la loi de Newton.

« ..... En même temps, l'Astronomie nous apprenait à ne pas nous effrayer des grands nombres, et cela était nécessaire, non seulement pour connaître le ciel, mais pour connaître la Terre elle-même, et cela n'était pas aussi facile qu'il nous semble aujourd'hui.

« Essayons de revenir en arrière et de nous figurer ce qu'aurait pensé un Grec à qui l'on serait venu dire que la lumière rouge vibre quatre cents millions de millions de fois par seconde. Sans aucun doute une pareille assertion lui aurait paru une pure folie et il ne se serait jamais abaissé à la contrôler. Aujourd'hui une hypothèse ne nous paraîtra plus absurde parce qu'elle nous oblige à imaginer des objets beaucoup plus grands ou beaucoup plus petits que ceux que nos sens sont capables de nous montrer, et nous ne comprenons plus ces scrupules qui arrêtaient nos devanciers et les empêchaient de découvrir certaines vérités, simplement parce qu'ils en avaient peur. Mais pourquoi? C'est parce que nous avons vu le ciel s'agrandir et s'agrandir sans cesse; parce que nous savons que le Soleil est à 150 millions de kilomètres de la Terre et que la distance des étoiles les plus rapprochées est des centaines de mille fois plus grande encore. Habitués à contempler l'infiniment grand, nous sommes devenus aptes à comprendre l'infiniment petit. Grâce à l'éducation qu'elle a reçue, notre imagination, comme l'œil de l'aigle que le Soleil n'éblouit pas, peut regarder la vérité face à face.

« ..... Mais, dira-on, l'Astronomie a donné aux autres

sciences tout ce qu'elle pouvait leur donner, et maintenant que le ciel nous a procuré les instruments qui nous permettent d'étudier la nature terrestre, il pourrait sans danger se voiler pour toujours. Après ce que nous venons de dire, est-il besoin de répondre à cette objection? On aurait pu raisonner de même du temps de Ptolémée; alors aussi, on croyait tout savoir, et l'on avait encore presque tout à apprendre.

« Les astres sont des laboratoires grandioses, des creusets gigantesques, comme aucun chimiste ne pourrait en rêver. Il y règne des températures qu'il nous est impossible de réaliser. Leur seul défaut, c'est d'être un peu loin; mais le télescope va les rapprocher de nous, et alors nous verrons comment la matière s'y comporte. Quelle bonne fortune pour le physicien et le chimiste!

« La matière s'y montrera à nous sous mille états divers, depuis ces gaz raréfiés qui semblent former les nébuleuses et qui s'illuminent de je ne sais quelle lueur d'origine mystérieuse, jusqu'aux étoiles incandescentes et aux planètes si voisines et pourtant si différentes de nous.

« Peut-être même les astres nous apprendront-ils un jour quelque chose sur la vie; cela semble un rêve insensé, et je ne vois pas du tout comment il pourrait se réaliser; mais, il y a cent ans, la chimie des astres n'aurait-elle pas paru aussi un rêve insensé? »

Enfin l'Astronomie nous a montré, plus que toute autre science, la nécessité d'une recherche désintéressée du vrai. Les esprits trop exclusivement orientés vers la pratique et vers un intérêt matériel immédiat (et ce sont les plus nombreux dans l'humanité) se demandent toujours, en face d'une théorie qui leur semble trop abstraite, à quoi elle peut bien servir. Leur répondre que quand même elle ne devrait jamais avoir d'utilité pratique elle vaudrait encore la peine de tenter nos efforts et de solliciter notre admiration, comme la peinture ou la musique, serait sans doute pour eux un argument insuffisant. Une meilleure réponse consisterait à montrer la solidarité de toutes les parties de la Science, à

faire voir, par exemple, que l'Astronomie a donné un essor incomparable à la Mécanique, science théorique autant que pratique, à laquelle nous devons l'admirable structure d'une locomotive, d'un automobile ou d'un aéroplane. Il y a plus; la nature, par sa complexité même, nous pose souvent des problèmes qui demeureraient pour nous insolubles si une recherche mathématique antécédente ou une théorie scientifique étrangère à la question qui nous occupe, et purement désintéressées, ne nous permettaient, par le moyen de l'analogie, de prendre pied dans le réel et de le décomposer en éléments intelligibles. Il n'y a pas d'application pratique valable s'il n'existe d'abord une théorie, et toute théorie suppose, au moins provisoirement, une attitude désintéressée en face de la vérité.

« Si la puissance prépondérante de notre organisation, dit Auguste Comte (1), ne corrigeait, même involontairement dans l'esprit des savants, ce qu'il y a sous ce rapport d'incomplet et d'étroit dans la tendance générale de notre époque, l'intelligence humaine, réduite à ne s'occuper que de recherches susceptibles d'une utilité pratique immédiate, se trouverait, par cela seul, comme l'a très justement remarqué Condorcet, tout à fait arrêtée dans ses progrès, même à l'égard de ces applications auxquelles on aurait imprudemment sacrifié les travaux purement spéculatifs; car les applications les plus importantes dérivent constamment de théories formées dans une simple intention scientifique, et qui souvent ont été cultivées pendant plusieurs siècles sans produire aucun résultat pratique. On en peut citer un exemple bien remarquable dans les belles spéculations des géomètres grecs sur les sections coniques, qui, après une longue suite de générations, ont servi, en déterminant la rénovation de l'astronomie, à conduire finalement l'art de la navigation au degré de perfectionnement qu'il a atteint dans ces derniers temps et auquel il ne serait jamais parvenu sans les travaux si purement théoriques d'Archimède et

(1) *Cours de philosophie positive*, 2e leçon.

d'Apollonius; tellement que Condorcet a pu dire avec raison à cet égard : « Le matelot qu'une exacte observation de la « longitude préserve du naufrage doit la vie à une théorie « conçue, deux mille ans auparavant, par des hommes de « génie, qui avaient en vue de simples spéculations géo- « métriques. »

« Il est donc évident qu'après avoir conçu, d'une manière générale, l'étude de la nature comme servant de base rationnelle à l'action sur la nature, l'esprit humain doit procéder aux recherches théoriques, en faisant complètement abstraction de toute considération pratique, car nos moyens pour découvrir la vérité sont tellement faibles que, si nous ne les concentrions pas exclusivement vers ce but, et si, en cherchant la vérité, nous nous imposions en même temps la condition étrangère d'y trouver une utilité pratique immédiate, il nous serait presque toujours impossible d'y parvenir. »

Nous procéderons, dans cette étude de l'*Astronomie au XIX*e *siècle,* autant que possible par citations. Cette méthode, en ne faisant appel à l'interprétation que quand cela est indispensable, offre plus de chances de précision. Elle permettra en outre au lecteur d'apprécier le style de grands savants qui, bien que sévère et concis, n'en présente pas moins parfois de fort belles qualités.

La première partieaur a trait à l'*Astronomie mathématique* et aux admirables découvertes que l'on doit à la loi de la gravitation universelle.

Dans la seconde partie, nous exposerons les *hypothèses* qui ont été données touchant le passé de notre système solaire et les prévisions que l'on a tentées sur son avenir.

Dans la dernière partie enfin, après avoir dit quelques mots des *instruments astronomiques* et de leur précision, nous montrerons ce que l'on sait, grâce surtout à la photographie et à l'analyse spectrale, de la constitution du Soleil, des diverses planètes et même des étoiles et des comètes.



L'Astronomie au XIXᵉ siècle

PREMIÈRE PARTIE

ASTRONOMIE MATHÉMATIQUE OU MÉCANIQUE CÉLESTE

L'Astronomie mathématique, ou Mécanique céleste, peut se résumer en une loi, la plus précise et la mieux établie de toutes les lois physiques : celle de la gravitation universelle dont la formule a été donnée par Newton vers la fin du XVIIᵉ siècle. L'importance de cette loi est telle dans l'Astronomie moderne, sorte de généralisation progressive de la loi de Newton, qu'il est indispensable d'entrer dans quelques détails à son sujet.

I. — PRINCIPES ET LOIS GÉNÉRALES

On sait l'importance de la révolution introduite par Copernic en Astronomie : le Soleil substitué à la Terre comme centre du monde, et les diverses planètes, y compris la Terre, gravitant autour de lui sur des orbites circulaires.

Képler (1571-1630) fit un pas de plus en montrant, d'après les observations de Tycho-Brahé (1546-1601), qu'il fallait renoncer au cercle et admettre que la planète se meut sur une ellipse dont le Soleil occupe un foyer. Les trois lois qu'il énonça sont de la plus haute importance; elles ont servi de base à la théorie de Newton, dont elles peuvent être considérées comme une conséquence approchée, et elles représentent aujourd'hui encore très sensiblement la marche des phénomènes.

Lois de Képler. — PREMIÈRE LOI. — *Les Planètes décrivent autour du Soleil des ellipses (fig. 2) dont cet astre occupe un foyer* (1).

DEUXIÈME LOI. — *Les aires décrites par le rayon vecteur allant du centre du Soleil au centre de chaque planète sont proportionnelles aux temps employés à les décrire.*

Soit AF (*fig.* 1) le grand axe sur lequel se trouve placé le centre

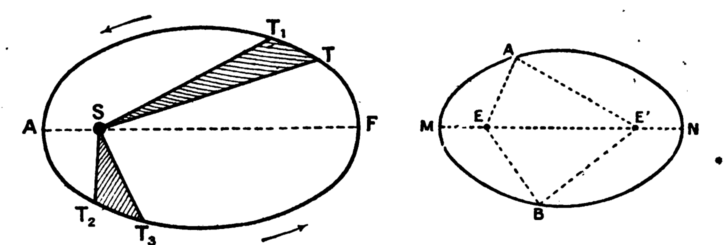


Fig. 1. — Explication géométrique des lois de Képler.

Fig. 2. — Ellipse.

du Soleil, et soit TST_1 l'aire balayée par le rayon vecteur de la Terre TS en l'espace d'un mois, par exemple. Soit d'autre part T_2ST_3 une aire analogue balayée durant le même temps : il faut que ces deux aires soient égales. De là résulte une importante conséquence : la vitesse de la Terre à l'*aphélie*, c'est-à-dire en F, à sa position la plus éloignée du Soleil, doit être plus petite que sa vitesse au *périhélie*, c'est-à-dire en A, à sa position la plus voisine du Soleil, et aller en augmentant d'une façon continue de F en A pour diminuer de A en F. Il en est ainsi pour toutes les planètes. Cette loi est connue aussi sous le nom de *Principe des aires*.

TROISIÈME LOI. — *Les carrés des durées des révolutions des planètes sont proportionnels aux cubes des demi-grands axes de leurs orbites.*

Soit a, a', *t*, *t'*, les demi-grands axes et les durées des révolutions de deux planètes. On doit avoir la formule :

$$\frac{t'^2}{t^2} = \frac{a'^3}{a^3}.$$

Cette loi nous montre en particulier que, connaissant le grand axe de l'orbite d'une planète quelconque, on peut en déduire immédiatement, en supposant toutefois connu le mouvement de la Terre par exemple, la durée de sa révolution autour du Soleil.

(1) On sait que l'ellipse (*fig.* 2) est une courbe telle que la somme des distances de chacun de ses points à deux points fixes E et E' nommés foyers est constante.

On a ainsi AE + AE' = BE + BE = Cte.

La ligne MN se nomme grand axe de l'ellipse ; on la représente par 2a.

Avec Newton, la Mécanique intervient dans l'explication des mouvements astronomiques. D'après le principe de l'inertie, un corps soustrait à l'action de toute force décrit une ligne droite d'un mouvement uniforme; tel n'est pas le cas des planètes. Elles sont donc soumises à une force que Newton entreprit de calculer en partant des lois de Képler. Il arriva ainsi, après plus de dix années de travail, à énoncer ce théorème capital :

Le Soleil exerce à chaque instant sur les planètes une attraction proportionnelle à leur masse et en raison inverse du carré de leur distance au Soleil.

Par généralisations progressives, Newton montra que la Terre exerce une action analogue sur la Lune et que la pesanteur n'est qu'un cas particulier de cette attraction. D'où cette conclusion générale :

Deux mobiles quelconques de notre système planétaire, ayant pour masse m et m' et séparés par une distance D, exercent l'un sur l'autre une attraction dirigée suivant la droite qui les joint et dont l'intensité est :

$$f \frac{m\,m'}{D^2},$$

où f désigne une quantité constante.

Nous verrons que cette loi peut s'étendre même au mouvement des étoiles.

La loi de Newton avait changé complètement la face du problème astronomique en lui donnant une unité et une généralité qu'il n'avait jamais comportées jusqu'alors. Son premier résultat fut de montrer que les lois de Képler n'ont qu'une valeur approchée et de fonder par là même ce qui constitue le centre de toute l'Astronomie moderne : le calcul des perturbations. Le problème à résoudre est, en somme, le célèbre *problème des trois corps* (1), qui surpasse aujourd'hui encore les forces de la science : on ne peut en obtenir que des solutions approximatives.

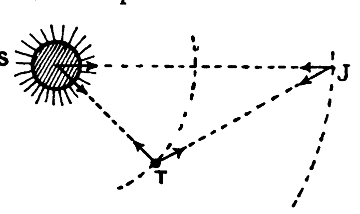


Fig. 3. — Problème des trois corps appliqué à l'Astronomie.

Newton ne s'était occupé que des perturbations des comètes. Clairaut et d'Alembert avaient abordé avec succès l'étude du mouvement de la Lune conformément aux principes de Newton. La-

(1) Ce problème peut s'énoncer ainsi : Soit trois corps (*fig.* 3), le Soleil S, la Terre T et Jupiter J, par exemple, supposés s'attirer suivant la loi de Newton : connaissant leurs vitesses à un moment donné, calculer leur mouvement réciproque. On est conduit à un système d'équations différentielles dont l'intégration est impossible.

grange (1) et Laplace (2) se sont immortalisés par leurs recherches sur les *perturbations des planètes*. Voici, d'après Tisserand (3), un aperçu des travaux de ces deux savants :

Les perturbations des planètes. — « Les lois de Képler, dit Tisserand (4), représentaient, avec une fidélité parfaite, toutes les observations de Tycho-Brahé. Il était possible, désormais, de calculer à l'avance les positions des planètes; pour y arriver, il suffisait de connaître pour chacune d'elles six quantités que l'on nomme *éléments elliptiques*.

« Il faut déterminer, en premier lieu, la situation dans l'espace du plan de l'ellipse. Pour cela, on considère un plan

(1) LAGRANGE (Joseph-Louis), né à Turin en 1736, est mort à Paris en 1813. Nommé, à dix-neuf ans, professeur à l'Ecole d'artillerie de Turin, il fonda, avec ses élèves, l'Académie de Turin. Il succéda à Euler comme président de l'Académie de Berlin. Ses principaux ouvrages ont trait au Calcul différentiel, à la Mécanique rationnelle et à la Mécanique céleste, qui lui doit des théorèmes nouveaux. Il avait composé, à Berlin, sa *Mécanique analytique*, qui fut publiée à Paris. Il était associé étranger de l'Académie des sciences; pour lui donner droit de suffrage, on changea son titre en celui de pensionnaire vétéran. La Révolution ne l'atteignit pas directement. Il avait été nommé président de la commission chargée de l'établissement du nouveau système des poids et mesures, puis l'un des administrateurs de la Monnaie; un arrêté du Comité de Salut public l'avait dispensé d'obéir au décret de la Convention qui bannissait tous les étrangers. Napoléon le combla d'honneurs. Après sa mort, ses restes furent déposés au Panthéon.

(2) LAPLACE (Pierre-Simon), né à Beaumont-en-Auge (Calvados) en 1745, est mort à Paris en 1827. Fils d'un cultivateur, il étudia et professa ensuite les mathématiques à l'école militaire établie dans sa ville natale. Membre de l'ancienne Académie des sciences, il fit partie de l'Institut lors de sa création. Bonaparte lui confia le ministère de l'Intérieur après le 18-Brumaire, mais il le remplaça bientôt par Lucien. Laplace entra au Sénat en 1799 et en devint vice-président en 1803. La Restauration le fit pair et marquis. Il faisait partie de l'Académie française.

Les principaux ouvrages de Laplace ont trait à la Mécanique céleste. Le plus célèbre est son *Exposition du système du monde*, dont cinq éditions furent publiées de 1796 à 1824. Ses travaux sur la Lune, Saturne, les satellites de Jupiter, sont de premier ordre. Enfin, il a le premier tenté avec succès une explication scientifique de l'origine de l'univers dans sa célèbre hypothèse de la Nébuleuse.

(3) TISSERAND (François) [1845-1896]. Ancien élève de l'École normale supérieure, il fut d'abord nommé astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris. Reçu docteur en 1868 avec une thèse d'astronomie fort remarquée, il fut successivement directeur de l'Observatoire de Toulouse, membre de l'Académie des sciences en 1878, professeur de mécanique rationnelle à la Sorbonne, ensuite de mécanique céleste, enfin directeur de l'Observatoire de Paris en 1892. — Ses travaux ont porté surtout sur l'astronomie mathématique; il fit aussi de l'astronomie d'observation. Son œuvre capitale, *Traité de mécanique céleste*, peut être mise en parallèle avec celle de Laplace, qu'elle complète.

(4) TISSERAND, Notice sur les perturbations (*Annuaire du Bureau des Longitudes*).

fixe; l'intersection de ce plan avec celui de l'ellipse doit être connue, de même que l'inclinaison mutuelle de ces deux plans : voilà les deux premiers éléments. Il faut ensuite orienter l'ellipse dans son plan, fixer dans ce plan la direction du grand axe, ce qui introduit un troisième élément; on doit encore définir la forme de l'orbite, de combien elle diffère d'un cercle : ainsi se trouve amené le quatrième élément elliptique, l'excentricité. On détermine ensuite la grandeur absolue de l'orbite par son grand axe, ou plutôt par sa moitié, la distance moyenne de la planète au Soleil. Si l'on donne enfin l'époque à laquelle la planète passe en un point déterminé de son orbite, on aura complété l'ensemble des six éléments du mouvement elliptique. »

Cependant la loi de Newton nous apprend que la planète n'est pas soumise à la seule attraction du Soleil : elle est attirée par toutes les autres planètes; sous l'influence de ces forces variables, son mouvement ne sera donc plus elliptique, mais très compliqué. Il faut ainsi renoncer aux lois de Képler et, partant du seul principe de la gravitation universelle, déterminer le mouvement réciproque des planètes, en tenant compte de toutes les actions qui s'exercent sur chacune d'elles. Problème immense dont on ne peut, dans l'état actuel de l'analyse mathématique, obtenir qu'une solution approchée.

« La première circonstance qui facilite les observations est la prépondérance du Soleil dans notre système planétaire; on démontre, en effet, que, si l'on supposait toutes les planètes réunies en un seul et même corps, la masse de ce corps serait tout au plus la 1/700 partie de celle du Soleil. Les distances mutuelles des planètes prises deux à deux, ne devenant jamais très petites, on voit que l'attraction de deux planètes l'une sur l'autre ne sera jamais qu'une petite fraction de celle que le Soleil exerce sur chacune d'elles; quelques nombres donneront une idée sensible de cette petitesse.

« Si la Terre était affranchie brusquement de toutes les forces qui agissent sur elle, elle se mouvrait en ligne droite d'un mouvement uniforme, parcourant environ 106000 kilomètres à l'heure. Le Soleil, par son attraction, la fait tom-

ber de 38 kilomètres pendant le même temps; cette quantité représente l'écart de la tangente et de l'ellipse sur laquelle le Soleil maintiendrait la Terre s'il existait seul avec elle; la plus grosse planète, Jupiter, peut, quand elle agit dans les conditions les plus favorables, dévier la Terre pendant le même temps de $2^{m},10$ seulement, c'est-à-dire 18 000 fois moins que le Soleil. Dans les mêmes conditions, la déviation produite par Vénus ne s'élèverait qu'à $1^{m},25$. On trouve de même, en comparant les effets produits pendant le même temps par Saturne et le Soleil agissant sur Jupiter, que le premier est au plus égal à la 1/1700 partie du second; mais l'effet de Jupiter sur Saturne peut, dans certains cas, s'élever à la 1/150 partie de celui du Soleil agissant sur la même planète. »

Variation des éléments elliptiques. — « Puisque, dans notre système, l'attraction du Soleil est partout et largement prépondérante, il est bien naturel de la considérer à part; à elle seule, elle ferait décrire à une planète indéfiniment la même ellipse; c'est là une première approximation du mouvement réel; c'est cette approximation que Képler a déduite des observations de Tycho-Brahé.

« Les petites forces provenant des actions des autres planètes seront des forces perturbatrices, qui tendraient à éloigner un peu d'abord, beaucoup à la longue, la planète considérée de son ellipse; cet effet est désigné sous le nom général de perturbations. On comprend du reste, d'après les nombres rapportés plus haut, que les perturbations seront plus ou moins grandes suivant les cas, très faibles pour la Terre, très sensibles pour Saturne, par exemple.

« Si l'on comparait indéfiniment le mouvement réel au mouvement sur une même ellipse, on finirait, avec le temps, par avoir des écarts considérables. Aussi divise-t-on l'orbite réellement décrite par chaque planète en un certain nombre de parties; si, en chacun des points de division, on venait à supprimer toutes les forces perturbatrices, la planète décrirait une ellipse autour du Soleil, conformément aux lois de Képler; autant de points de division dans l'orbite, autant

d'ellipses différentes. On supposera que la planète se meut d'abord sur la première ellipse, puis sur la seconde, etc.; il convient de remarquer que, en raison de la petitesse des actions perturbatrices, chacune de ces courbes différera peu de celles qui l'avoisinent. On aura donc ainsi décomposé le mouvement réel de la planète en une succession de mouvements elliptiques. On pourra dire encore que le mouvement elliptique s'effectue toujours sur une ellipse dont la position, la forme, etc., les éléments, en un mot, seront variables avec le temps, d'une manière continue, si le nombre des points de division, dont on a parlé plus haut, croît indéfiniment.

« Au lieu de chercher à déterminer immédiatement la position que doit occuper une planète à une certaine époque, on calculera les valeurs que prendront à cette époque les six éléments elliptiques, et l'on en déduira bien aisément la position cherchée.

« Ces éléments ne seront plus égaux aux valeurs constantes qu'ils auraient si le Soleil agissait seul, mais à ces valeurs augmentées ou diminuées d'une série de petits termes que l'on nomme des inégalités; on distingue plusieurs sortes d'inégalités. »

Inégalités séculaires. — « Considérons, pour fixer les idées, la Terre et Jupiter. Si Jupiter sollicitait la Terre constamment dans la même direction, la déviation que nous avons trouvée très petite, d'environ 2 mètres pour une heure, se traduirait à la longue par un effet considérable, car une force, supposée constante pendant un certain temps, fait parvenir au corps, auquel elle est appliquée, un espace proportionnel au carré du temps. La Terre, sollicitée vers le Soleil par une force considérable, finirait donc, sous l'action d'une force perturbatrice très faible, par prendre un mouvement essentiellement différent du mouvement elliptique. Mais il faut remarquer que cette force perturbatrice ne reste pas constante et surtout qu'elle n'agit pas toujours dans le même sens, parce que Jupiter et la Terre sont en mouvement sous leurs orbites respectives; tantôt, l'action perturbatrice de Jupiter

sollicite la Terre dans un sens, tantôt dans un sens opposé; au bout d'un intervalle de temps qui aura ramené les deux planètes à peu près dans les mêmes positions où elles étaient d'abord, une grande partie des perturbations de la Terre se trouvera naturellement compensée, les effets élémentaires s'étant presque entièrement détruits deux à deux; mais la compensation n'est pas parfaite, et cela tient surtout à ce que les orbites ne sont pas symétriques par rapport au Soleil; au bout du cycle considéré, les éléments elliptiques de la Terre auront donc augmenté ou diminué de petites quantités; un second cycle semblable reproduira la même augmentation ou la même diminution, etc. On pourra donc avoir à la longue, dans les divers éléments elliptiques de la Terre, des variations sensiblement proportionnelles au temps; c'est là ce que l'on nomme des inégalités séculaires. Insensibles pour un petit intervalle de temps, leur accumulation répétée peut, dans le cours des siècles, arriver à les rendre considérables. »

Inégalités périodiques. — « Ces inégalités dépendent de la configuration mutuelle des planètes; elles redeviennent sensiblement les mêmes quand cette configuration se trouve à peu près rétablie. Leur allure générale est facile à saisir : que l'on conçoive un mobile animé d'un mouvement uniforme sur une circonférence; la distance du centre de cette circonférence à la projection du mobile sur un diamètre représente exactement l'une quelconque des inégalités périodiques, qui ne différeront les unes des autres que par la grandeur de la circonférence, la vitesse du mobile et l'instant où il passe par l'extrémité du diamètre considéré.

« Chacun des éléments elliptiques d'une planète est affecté d'un nombre illimité d'inégalités périodiques; fort heureusement, quand on s'éloigne dans la série, la plus grande valeur que peut atteindre chacune d'elles diminue rapidement, de sorte qu'il n'y a réellement lieu d'en considérer qu'un nombre assez restreint.

« On peut envisager l'ensemble des inégalités périodiques comme formant un mouvement oscillatoire autour d'un état

moyen rendu lui-même progressivement variable en vertu des inégalités séculaires. Quand on veut se borner à rechercher quel serait l'aspect général du système solaire au bout d'un grand nombre de siècles, on peut laisser de côté les inégalités périodiques et considérer seulement les inégalités séculaires. »

Inégalités à longue période. — « Il nous reste à parler d'une troisième sorte d'inégalités qui jouent un rôle considérable dans la théorie des perturbations planétaires et dont la découverte est l'un des plus beaux titres de gloire de Laplace. Considérons les planètes Jupiter et Saturne, pour lesquelles les inégalités du nouveau genre sont considérables : il se présente cette circonstance particulière que, pendant que Jupiter fait cinq de ses révolutions, Saturne en accomplit à fort peu près deux des siennes.

« On trouve, en effet, que cinq révolutions de Jupiter font 21 663 jours, tandis que deux de Saturne en font 21 518; ces deux nombres sont presque égaux; leur différence, 145, est petite par rapport à chacun d'eux; c'est ce que l'on exprime en disant que les durées des révolutions de Jupiter et de Saturne sont à peu près dans un rapport commensurable, celui de 2 à 5. Cette circonstance joue un rôle important, comme on va le voir. Il en résulte, en effet, qu'au bout d'un cycle de 21 663 jours ou d'environ cinquante-neuf ans, les deux planètes se retrouvent presque dans les mêmes positions qu'elles occupaient d'abord; les inégalités périodiques ordinaires seront donc alors sensiblement devenues les mêmes qu'au point de départ, sans que la compensation ait été exacte; il y aura donc une certaine résultante pour les perturbations de chacune des deux planètes. Pendant les diverses parties du second cycle, les positions respectives de Jupiter et de Saturne seront presque les mêmes que pendant les parties correspondantes du premier; à la fin du second cycle, l'effet des perturbations sera presque doublé, il sera triplé à la fin du troisième, etc.; mais, au bout d'un certain nombre de cycles, les positions des planètes seront très différentes de ce qu'elles étaient d'abord, ce qui tient à ce que

le rapport de 5 à 2 ne se trouve réalisé que d'une manière approchée; la compensation tendra alors à s'établir; il en résulte, dans les mouvements des deux planètes, des inégalités dont la période est fort longue, et d'environ 900 ans; elles sont du reste considérables, comme on l'indiquera plus loin.

« La circonstance qui s'est présentée pour Jupiter et Saturne est loin d'être une exception dans notre système planétaire; ainsi la durée de révolution de Neptune est sensiblement le double de celle d'Uranus; ainsi encore les durées de révolution de Vénus et de la Terre sont fort à peu près dans le rapport de 8 à 13. Ces rapports approchés de commensurabilité ont pour effet de rendre très sensibles des inégalités qui devraient être presque nulles, d'après le rang élevé qu'elles occupent dans la série de l'ensemble des inégalités périodiques.

« Il ne peut entrer dans le cadre de ce travail de donner une idée des méthodes employées par les géomètres et les astronomes, dans le calcul long et délicat des inégalités planétaires; nous nous bornerons à dire que les développements analytiques que nécessite la solution sont rendus possibles, et relativement faciles malgré leur longueur, par la petitesse des excentricités des orbites et aussi par les faibles inclinaisons mutuelles de ces orbites; les calculs tels que les a faits Le Verrier pour notre système planétaire tout entier (en exceptant ce qui se rapporte aux satellites, et en particulier à la Lune) reposent presque entièrement sur les admirables travaux de Lagrange et de Laplace.

« Dans la pratique, on reporte l'effet des inégalités périodiques des éléments elliptiques sur la position même de chaque planète; on conçoit alors une planète fictive qui se meut conformément aux lois de Képler sur une ellipse dont les éléments varient régulièrement par nuances insensibles, en vertu des seules inégalités séculaires, tandis que la vraie planète oscille autour de cette planète fictive, sur une courbe ayant de très petites dimensions, et dont la nature dépend des inégalités périodiques.

« Nous allons chercher à donner une idée des dimensions

de cette petite courbe dans le cas de la Terre. Figurons l'orbite de la planète fictive qui va remplacer la Terre par une ellipse dont le grand axe soit égal à 10 mètres (ce sera une courbe peu différente d'un cercle ayant 5 mètres de rayon); cette ellipse variera très lentement par suite des inégalités séculaires; eh bien! la position de la Terre ne sera jamais éloignée de celle de la planète fictive de plus de 1 millimètre.

« Quant aux variations séculaires des éléments de cette ellipse, elles sont très faibles et ne deviennent bien sensibles qu'au bout d'un temps très long; nous nous bornerons à dire actuellement que, en une année, le grand axe de l'ellipse tourne dans son plan d'un petit angle de 12″, et que ce plan tourne pendant le même temps d'un angle encore plus petit, d'une demi-seconde d'arc.

« On voit donc qu'au bout d'une année la différence entre la position réelle de la Terre et celle qu'elle occupait sur une ellipse invariable est très faible.

« Pour Mercure et Vénus, les inégalités périodiques sont encore très petites; elles ne peuvent altérer d'une demi-minute d'arc les longitudes de ces planètes vues du Soleil.

« Elles sont plus sensibles dans le cas de Mars, à cause du rapprochement qui peut se produire entre cette planète et la plus grosse de toutes, Jupiter; leur effet peut s'élever à 1′ environ; tel était à peu près le degré d'exactitude des observations de Tycho-Brahé, et l'on comprend que ces inégalités n'aient pu être constatées par Képler.

« Les inégalités périodiques de Jupiter et de Saturne sont très sensibles; mais la plus considérable, et de beaucoup, est l'inégalité à longue période dont on a parlé plus haut; elle peut altérer de 20′ la longitude de Jupiter et de 50′ celle de Saturne; la distance angulaire des deux planètes peut donc, dans des conditions favorables, être modifiée de 1° 10′, c'est-à-dire de plus du double du diamètre apparent de la Lune. On comprend combien doit être long et compliqué le calcul des perturbations, lorsqu'on y rencontre des inégalités aussi importantes; pour en donner une faible idée, nous dirons que les théories des quatre grosses planètes, Jupiter,

Saturne, Uranus et Neptune, telles que Le Verrier les a données, comprennent cinq énormes volumes contenant ensemble environ 2 300 pages : les calculs auxiliaires, qui n'ont pas été imprimés, forment un ensemble trois ou quatre fois plus considérable. »

Stabilité du système planétaire. — « En réfléchissant à l'effet progressif des inégalités séculaires, on est conduit à se poser des questions qui sont du plus haut intérêt pour l'avenir du système solaire.

« Le plan de l'orbite de la Terre va actuellement en se rapprochant de celui de l'équateur : le rapprochement des deux plans continuera-t-il toujours, de manière à amener leur coïncidence dans un avenir éloigné et à réaliser pour tous les points de la Terre l'égalité des jours et des nuits?

« L'excentricité de l'orbite de Mercure, déjà si notable, augmente d'année en année; cette planète est-elle donc destinée à circuler un jour dans une orbite analogue à celle des comètes périodiques?

« Enfin, si les grands axes des orbites étaient assujettis à des inégalités séculaires, les planètes ne finiraient-elles pas, ou par se précipiter sur le Soleil, ou par s'en éloigner indéfiniment?

« Laplace a soumis ces questions importantes à une savante analyse, complétée sur certains points par Lagrange et par Poisson. Il a prouvé que, dans le cours des siècles, les points où les orbites des planètes rencontrent l'écliptique peuvent parcourir tous les signes du zodiaque; les extrémités des grands axes de ces orbites peuvent faire le tour entier du ciel; mais dans cet ensemble de mouvements si complexes et si divers, il est un élément qui reste constant, ou du moins ne varie qu'entre des limites très étroites : les grands axes des orbites planétaires n'ont pas d'inégalités séculaires; ils ne font qu'osciller de part et d'autre de leur valeur moyenne, en vertu des inégalités périodiques : ces grands axes, qui sont aujourd'hui très différents les uns des autres, le seront donc toujours.

« Il en résulte que les temps des révolutions des diverses

planètes sont constants, ou du moins ne sont soumis qu'à des changements périodiques. Ce beau théorème est la base fondamentale sur laquelle repose aujourd'hui l'astronomie théorique, de même que l'astronomie d'observation est fondée sur l'invariabilité de la durée du jour sidéral.

« Laplace a démontré ensuite que du seul fait que les planètes se meuvent toutes dans le même sens, dans des orbites qui sont aujourd'hui peu excentriques et peu inclinées les unes sur les autres, on peut conclure que les excentricités et les inclinaisons mutuelles resteront toujours petites et comprises entre des limites assez étroites que l'on peut assigner.

« L'excentricité de l'orbite de Mercure n'ira donc pas trop en augmentant; elle ne dépassera jamais une limite peu différente de sa valeur actuelle. De même l'excentricité de l'orbite terrestre, qui décroît actuellement, ne le fera pas toujours; dans 24 000 ans, elle aura atteint sa plus petite valeur, après quoi elle augmentera pendant très longtemps, sans jamais dépasser une valeur égale à trois fois environ la valeur actuelle, pour diminuer de nouveau.

« L'écliptique ne se rapprochera pas toujours de l'équateur; jamais ces deux plans ne coïncideront; leur inclinaison ne fera qu'osciller en plus ou en moins de sa valeur moyenne, sans s'en écarter de plus de 4°.

« A plusieurs milliers d'années de distance, les astronomes qui étudieront le système planétaire le trouveront donc semblable à celui que nous connaissons; les caractères généraux seront les mêmes; les orbites seront encore presque circulaires et fort peu inclinées les unes sur les autres; les distances moyennes au Soleil et les durées des révolutions seront les mêmes; c'est en cela que consiste la stabilité du système planétaire.

« Il a fallu le génie de Laplace pour démêler ces lois simples à travers les effets complexes des forces qui sillonnent le système solaire. »



II. — DÉCOUVERTE DE NEPTUNE

La planète Uranus, découverte accidentellement en 1781 par W. Herschel, fut observée régulièrement jusqu'en 1820, et Laplace, dans sa *Mécanique céleste,* étudia les perturbations produites sur la planète par Jupiter et Saturne, assez rapprochés d'elle et dont les masses sont considérables. On pouvait penser, en partant de ces données, arriver à représenter le mouvement de la planète au moyen de la loi de Newton. Le résultat ne fut pas heureux et, vers 1845, le désaccord entre la théorie et les observations était devenu considérable et bien supérieur à la limite des erreurs d'observation. Il parut alors évident que la planète Uranus était soumise à l'action de quelque masse inconnue, qu'il s'agissait de déterminer. Bessel écrivait :

« Je pense qu'un moment viendra où la solution du mystère d'Uranus sera peut-être bien fournie par une nouvelle planète, dont les éléments seraient reconnus par son action sur Uranus et vérifiés par celle qu'elle exerce sur Saturne. »

C'est à Le Verrier (1) que revint la gloire d'éclairer la question. Il entreprit en effet la solution du problème et, pour éviter toute démarche inutile, il voulut d'abord prouver qu'il était impossible de représenter les mouvements d'Uranus en fonction des seules

(1) Le Verrier (Urbain), astronome français, né à Saint-Lô (Manche) en 1811, est mort à Paris en 1877. Ancien élève de l'École polytechnique, il fut nommé dans la suite répétiteur à cette école. Élu membre de l'Institut en 1846, il découvrit peu après, par le seul calcul, la planète Neptune ; la plupart des Académies de l'Europe s'empressèrent de s'associer Le Verrier ; une chaire d'astronomie fut créée pour lui à la Faculté des sciences de Paris et il fut nommé astronome-adjoint au Bureau des Longitudes. Élu sénateur en 1852, il devint inspecteur général de l'enseignement supérieur, enfin directeur de l'Observatoire en 1854.

Le Verrier a perfectionné les théories de presque toutes les planètes ; on lui doit, outre la découverte de Neptune, l'hypothèse de l'existence de petites planètes situées entre le Soleil et Mercure, hypothèse non encore vérifiée jusqu'ici. On lui a élevé une statue dans la cour de l'Observatoire à Paris, en 1889.

actions perturbatrices de Jupiter et de Saturne. Les calculs furent tout à fait concluants et il put écrire :

« J'ai démontré, si je ne me trompe, qu'il y a incompatibilité formelle entre les observations d'Uranus et l'hypothèse que cette planète ne serait soumise qu'aux actions du Soleil et des autres planètes, agissant conformément aux principes de la gravitation universelle. On ne parviendra jamais, dans cette hypothèse, à représenter les mouvements observés. »

En présence d'une difficulté analogue, concernant la théorie de la Lune, Clairaut avait songé autrefois à modifier la loi de la gravitation universelle ; mais les calculs avaient finalement montré la vanité de cette tentative. Le Verrier, sans s'arrêter à cette idée, aborda l'hypothèse d'une planète encore inconnue, dont il entreprit de calculer la position et la masse.

Le problème offrait de grandes difficultés. Il faut d'abord déterminer les éléments de la planète inconnue et sa masse, ce qui fait 7 inconnues. De plus les éléments d'Uranus se trouvent modifiés par la supposition de la planète perturbatrice ; il faut les calculer à nouveau en fonction de cette hypothèse, ce qui donne 6 nouvelles inconnues ; en tout 13 quantités à déterminer.

Mais le problème pouvait se simplifier. On sait que les planètes sont presque couchées sur le plan de l'Écliptique avec lequel elles font de petits angles qui ne dépassent pas 2°30′ : on pouvait donc admettre que la planète se trouvait à peu près dans le plan de l'Écliptique. Les deux éléments destinés à fixer la position du plan de l'orbite de la planète inconnue étant ainsi éliminés, il en était de même des inconnues correspondantes pour Uranus, car le plan de son orbite ne saurait, dans ces conditions, être dérangé d'une manière sensible ; il ne restait donc plus que 9 inconnues ; le problème s'était simplifié, mais il demeurait encore presque inabordable.

Une simplification encore était possible grâce à la loi de Bode : si l'on considère la série des nombres : 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, dont chaque terme, à part le second, est le double du précédent, et si l'on ajoute 4 à chacun de ces nombres et que l'on divise le résultat par 10, les quotients obtenus représentent à fort peu près l'ensemble des distances moyennes des planètes au Soleil. Il existe cependant une lacune entre Mars et Jupiter ; et la loi régulière des variations des distances des planètes au Soleil, remarquée déjà par Képler, l'avait conduit à supposer entre Mars et Jupiter l'existence d'une planète. On sait qu'il existe en effet dans cette région, comme l'Astronomie moderne l'a prouvé, un essaim d'Astéroïdes, dont la distance moyenne est sensiblement exprimée par 2,8, c'est-à-dire rentre dans la loi de Bode.

Le tableau suivant montre ce rapport entre les distances réelles et les distances calculées d'après la loi de Bode :

	Distance réelle.	Distance calculée suivant la loi de Bode.
	—	—
Mercure.	0,4	0,4
Vénus.	0,7	0,7
La Terre	1	1
Mars.	1,5	1,6
»	»	2,8
Jupiter	5,2	5,2
Saturne.	9,5	10,0
Uranus	19,2	19,6

Le Verrier était donc fondé à admettre la valeur au moins approximative de cette loi, et à supposer, comme le montre la série indiquée, que la distance moyenne de la planète inconnue au Soleil était environ le double de celle d'Uranus ; on ne pouvait la supposer ni en deçà de Saturne, ni entre Saturne et Uranus, car elle aurait produit dans les mouvements de Saturne des dérangements que la théorie de cette planète, fort bien connue, ne permettait pas d'admettre.

Enfin, comme l'excentricité des anciennes planètes est petite, on pouvait supposer qu'il en était de même pour la nouvelle planète et négliger son carré, ce qui simplifie beaucoup le calcul. La question se trouvait ainsi posée par Le Verrier :

« Est-il possible que les inégalités d'Uranus soient dues à l'action d'une planète, située dans l'écliptique, à une distance moyenne double de celle d'Uranus, et s'il en est ainsi, où est actuellement située cette planète? Quels sont les éléments de l'orbite qu'elle parcourt? »

Parmi les 8 inconnues que comportait la question, 7 étaient du premier degré ; seule, la longitude de la planète cherchée entrait dans les équations d'une manière compliquée. Le Verrier lui donna successivement 40 valeurs équidistantes ; de là 40 solutions distinctes ; il s'agissait de choisir celle qui représenterait le mieux l'ensemble des observations d'Uranus. Le Verrier aboutit à cette conclusion :

« Il n'y a dans l'écliptique qu'une seule région dans laquelle on puisse placer la planète perturbatrice, de manière à rendre compte des mouvements d'Uranus ; la longitude moyenne de cette planète devait être, au 1er janvier 1800, de 243° à 252°. »

Le Verrier n'avait plus qu'à perfectionner sa solution en suivant une méthode analogue à celle qui l'avait conduit à ce beau résultat. Cela était relativement facile, et le mystère d'Uranus fut complètement éclairci. Le Verrier annonce alors à l'Académie des sciences, le 31 août 1846, que la planète cherchée se trouvera le 1er janvier 1847 par 326°32′ de longitude vraie, et il ajoute :

« L'opposition de la planète a eu lieu le 15 août dernier. Nous sommes donc à une époque très favorable pour la découvrir. L'avantage qui résulte de sa grande distance angulaire au Soleil ira en diminuant sans cesse ; mais comme la longueur des jours décroît maintenant très rapidement dans nos climats, nous nous trouverons longtemps encore dans une situation favorable aux recherches physiques qu'on voudra tenter.

« La nature et le succès de ces recherches dépendra du degré de visibilité de l'astre. Arrêtons-nous un moment à cette question. Examinons quelles sont actuellement, au moment de l'opposition, le diamètre apparent et l'éclat relatif de la planète cherchée.

« On sait qu'à une distance égale à dix-neuf fois la distance de la Terre au Soleil, le disque d'Uranus apparaît sous un angle de 4 secondes sexagésimales. La masse de cette dernière planète est connue; elle est deux fois et demie environ plus faible que celle de la nouvelle planète. Ces données, jointes aux précédentes, nous suffiraient pour calculer le diamètre apparent du nouvel astre, si nous connaissions le rapport de sa densité à celle d'Uranus. En général, les densités diminuent à mesure qu'on s'éloigne du Soleil. Nous ferons donc, quant au diamètre, une hypothèse défavorable à la visibilité de l'astre cherché, en admettant que sa densité soit égale à celle d'Uranus. Nous trouverons ainsi qu'au moment de l'opposition, la nouvelle planète devra être aperçue sous un angle de 3″,3. Ce diamètre est tout à fait de nature à être distingué, dans les bonnes lunettes, des diamètres factices, produits de diverses aberrations, si l'éclat du disque est suffisant.

« En supposant que le pouvoir réfléchissant de la surface de la nouvelle planète soit le même que celui de la surface

d'Uranus, son éclat spécifique actuel sera le tiers environ de l'éclat spécifique dont jouit Uranus quand il se trouve dans sa distance moyenne au Soleil.

« Ces conditions physiques me semblent promettre que non seulement on pourra apercevoir la nouvelle planète dans les bonnes lunettes, mais encore qu'on la distinguera par l'amplitude de son disque, que son apparence ne sera pas réduite à celle d'une étoile. C'est un point fort important. Si l'astre qu'il s'agit de découvrir peut être confondu, quant à l'aspect, avec les étoiles, il faudra, pour le distinguer parmi elles, observer toutes les petites étoiles qu'on voit dans la région du ciel qu'on doit explorer, et constater dans l'une d'entre elles un mouvement propre. Ce travail sera long et pénible. Mais si au contraire le disque de l'astre a une amplitude sensible qui ne permette pas de le confondre avec celui des étoiles, si l'on peut substituer, à la détermination rigoureuse de la position de tous les points lumineux, une simple étude de leur apparence physique, les recherches marcheront alors très rapidement. »

Le 18 septembre 1846, M. Galle, astronome de Berlin, découvrit la nouvelle planète, sur les indications mêmes de Le Verrier, à 52′ seulement de la position qui lui était assignée, et elle avait un diamètre apparent de 2″5 environ, ce qui confirmait aussi exactement qu'on pouvait le désirer, étant donné la difficulté du problème, les prédictions du grand astronome.

« Une telle découverte, dit Arago (1), doit occuper une place importante dans l'histoire de l'Astronomie. La méthode suivie par M. Le Verrier diffère complètement de tout ce qui a été tenté auparavant par les géomètres et les astronomes.

« Ceux-ci ont quelquefois trouvé accidentellement un point mobile, une planète dans le champ de leur télescope;

(1) Arago (François), né à Estagel (Pyrénées-Orientales) en 1786, mort à Paris en 1853. Élève de l'École polytechnique, il fut attaché en qualité de secrétaire au *Bureau des Longitudes*. En 1806, l'empereur l'adjoignait à Biot pour achever la mesure de l'arc du méridien terrestre. Il n'avait que vingt-trois ans lorsqu'il fut élu membre de l'Académie des sciences. Nommé directeur de l'Observatoire de Paris, il y fit des cours d'astronomie demeurés célèbres par leur admirable clarté. On lui doit l'explication la plus généralement admise sur la *scintillation des étoiles*. Il a contribué aussi, par de nombreux travaux, au développement de la Physique.



FRANÇOIS ARAGO (1786-1853)
Physicien et astronome français.
Né à Estagel (Pyrénées-Orientales), mort à Paris.

M. Le Verrier a aperçu le nouvel astre sans avoir besoin de jeter un seul regard vers le ciel; il l'a vu au bout de sa plume; il a déterminé par la seule puissance du calcul la place et la grandeur approximatives d'un corps situé bien au delà des limites jusqu'alors connues de notre système planétaire, d'un corps dont la distance au Soleil surpasse 1 100 millions de lieues, et qui, dans nos plus puissantes lunettes, offre un disque à peine sensible. Aussi, la découverte de M. Le Verrier est une des plus brillantes manifestations de l'exactitude des systèmes astronomiques modernes; elle encouragera les géomètres d'élite à chercher avec une nouvelle ardeur les vérités éternelles qui restent cachées, suivant une expression de Pline, dans la majesté des théories. »

Le 5 octobre 1846, en annonçant à l'Académie des sciences la confirmation éclatante de sa découverte, Le Verrier ajoutait :

« Ce succès doit nous laisser espérer qu'après trente ou quarante années d'observation de la nouvelle planète, on pourra l'employer à son tour à la découverte de celle qui la suit, dans l'ordre des distances du Soleil. Ainsi de suite, on tombera malheureusement bientôt sur des astres invisibles, à cause de leur immense distance du Soleil, mais dont les orbites finiront, dans la suite des siècles, par être tracées avec une grande exactitude, au moyen de la théorie des inégalités séculaires. »

Cet espoir n'a pas reçu jusqu'ici de confirmation, ce qui n'a rien d'étonnant si l'on songe que Neptune décrit son orbite en 165 ans et que trop peu de temps nous sépare, aujourd'hui encore, de sa découverte.

« Un cri unanime d'admiration, dit J. Bertrand à propos de cette découverte, salua d'un même hommage la science admirable entre toutes qui permit de si merveilleux desseins, et le savant assez patiemment habile pour atteindre le but, assez audacieux pour le signaler sans étonnement, assez sûr des principes pour s'y arrêter avec une tranquille confiance. Jamais succès si brillant ne sembla plus incon-

testable et plus juste. Pendant plusieurs mois, le grand événement agita les académies, remplit les recueils scientifiques et intéressa le monde entier à la marche de l'astre nouveau. Des témoignages de sympathie s'élevèrent de toute part; l'illustre Gauss, si peu empressé d'ordinaire à appeler l'attention sur un nom fameux à tant de titres, ne dédaigna pas de revendiquer l'avantage fortuit d'avoir le premier observé la planète au méridien. La Société royale de Londres s'empressa de décerner à Le Verrier la médaille de Copley; la Société de Gœttingue, sur la proposition de Gauss, l'inscrivit sur la liste de ses associés étrangers, et celle de Saint-Pétersbourg, par une innovation plus flatteuse encore, décida que la première place vacante, à quelque époque qu'elle se produisît, serait réservée à Le Verrier. »





III. — PLANÈTES INTRAMERCURIELLES

Après sa découverte de Neptune, Le Verrier devait s'illustrer encore, quelques années plus tard, par une nouvelle hypothèse, fondée presque uniquement elle aussi sur le calcul et qui, si elle n'a pas reçu une confirmation aussi nette que la première, peut du moins fournir une utile direction aux recherches astronomiques : Nous voulons parler de la théorie des *planètes intramercurielles.*

Mercure est la planète dont l'excentricité est la plus forte ; ses inégalités sont considérables et elles se trouvaient fort mal représentées par le calcul avant Le Verrier. Si l'on ajoute à cela que le voisinage du Soleil, dans la lumière duquel Mercure est toujours baigné, rend les observations de la planète assez courtes et fort délicates, on comprendra qu'elle ait fait pendant longtemps le désespoir des astronomes. Riccioli disait :

« Aucune planète n'a paru avoir des mouvements si compliqués; le Mercure céleste est aussi impénétrable pour les astronomes que le Mercure terrestre pour les alchimistes. »

Le Verrier essaya, dans un premier travail, en 1842, de représenter les mouvements de Mercure, en tenant compte de ses passages sur le Soleil. Ses résultats ne le satisfirent pas complètement, car il disait à l'Académie des sciences, le 2 juillet 1849 :

« L'invariabilité des moyens mouvements des astres sert de base aux observations depuis plus de deux mille ans, et cette base a pris un caractère de certitude mathématique par les travaux des géomètres français qui ont prouvé qu'en effet l'action mutuelle des planètes ne changeait pas leurs moyens mouvements; c'est une des conditions qui maintiennent l'ordre dans notre système planétaire. J'ai donc éprouvé une surprise profonde lorsque, en travaillant à la théorie de Mercure, j'ai vu que le moyen mouvement de cette planète, déterminé par les quarante dernières années d'observations, se trouvait notablement plus faible que par

la comparaison des anciennes observations avec les modernes, et mes efforts pour parvenir à une théorie dans laquelle il n'en fut pas ainsi ont été jusqu'à présent infructueux. »

Dix ans après, dans une lettre célèbre adressée à Faye, Le Verrier annonce qu'il est arrivé à une solution définitive et indique comme très probable l'existence d'une ou plusieurs planètes intra-mercurielles. Le mouvement de Mercure peut être représenté, en une première approximation, par une ellipse calculée suivant les lois de Képler. On détermine ensuite avec une exactitude très suffisante les perturbations assez petites occasionnées par la Terre, Mars, Jupiter. Reste ensuite à tenir compte de la perturbation la plus importante de toutes, celle que cause Vénus, située très près de Mercure et d'une masse à peu près égale à celle de la Terre. Le Verrier refit ce dernier calcul, et il trouva que la masse de Vénus, telle qu'on la connaissait alors, devait, si l'on voulait arriver à une représentation satisfaisante des mouvements de Mercure, être augmentée d'au moins 1/10 de sa valeur :

« Pour échapper à cette nécessité, dit Le Verrier, il faudrait admettre que des erreurs de plusieurs minutes dans l'estime des temps des phases (passages de Mercure sur le Soleil) auraient été commises dans de grands observatoires, par exemple en 1743 ou en 1753, à Paris, et par des observateurs exercés tels que Lacaille, de l'Isle, Bouguer, les Cassini. Hypothèse inadmissible! d'autant plus qu'il faudrait ajouter que ces erreurs grossières dans l'estime du temps d'un phénomène physique se seraient reproduites à diverses époques et d'une manière progressive et régulière! »

Mais alors une nouvelle difficulté se présente. On rend bien compte ainsi de toutes les anomalies du mouvement de Mercure, dont la théorie se trouve, avec cette augmentation, correspondre aussi exactement que possible aux faits; mais les mouvements de la Terre, sur laquelle Vénus, dont la masse est presque égale à celle de notre planète, exerce une action sensible, ne concordent plus avec la nouvelle théorie qui résulte de cette modification.
L'ensemble des positions de la Terre nous est connu par de nombreuses observations recueillies depuis 1750. Le Verrier les a discutées à nouveau; elles nous conduisent à adopter pour la Terre la masse déjà admise avant Le Verrier et non cette masse augmentée de 1/10. L'illustre astronome fut donc conduit à une hypothèse analogue à celle qui lui avait si bien réussi quelques années auparavant dans sa découverte de Neptune : il doit exister, entre Mer-

cure et le Soleil, une planète inconnue, pouvant causer des dérangements sensibles pour Mercure, tandis qu'elle ne troublerait pas d'une manière appréciable l'harmonie qui existe dans les théories de Vénus et de la Terre. Le mouvement de Mercure étant moins bien connu par l'observation que celui d'Uranus, Le Verrier ne pouvait espérer, comme pour Neptune, arriver à déterminer la position de la planète inconnue. Il n'obtint qu'une relation entre la masse de la planète et sa distance au Soleil, et la masse troublante devait être, comme on pouvait s'y attendre, d'autant plus considérable qu'elle serait plus voisine du Soleil. Le Verrier écrivait à ce sujet :

« Ainsi donc, à ne prendre que le point de vue mécanique, on peut, par l'hypothèse d'une masse troublante, dont la situation reste indéterminée, rendre compte des phénomènes observés. Il est toutefois indispensable d'examiner en outre si, sous le rapport physique, toutes les solutions sont également admissibles.

« A la distance moyenne de 0,17, la masse troublante serait précisément égale à la masse de Mercure. La plus grande *élongation* à laquelle elle pût atteindre serait un peu inférieure à 10°. Doit-on croire qu'une planète qui brillerait d'un éclat plus vif que Mercure aurait nécessairement été aperçue rasant l'horizon? Ou bien serait-il possible que l'intensité de la lumière diffusée du Soleil eût permis à un tel astre d'échapper à nos regards?

« Plus loin du Soleil, la masse troublante est plus faible, et il en est de même de son volume sans doute; l'élongation est plus grande. Plus près du Soleil, c'est l'inverse; et si l'éclat du corps troublant est augmenté par la dimension de ce corps et par le voisinage du Soleil, l'élongation devient si petite qu'il serait possible qu'un astre dont la position est inconnue n'eût pas été aperçu dans les circonstances ordinaires.

« Mais, dans ce cas même, comment un astre qui serait doué d'un très vif éclat, et qui se trouverait toujours très près du Soleil, n'eût-il point été entrevu durant quelqu'une des éclipses totales? Un tel astre enfin ne passerait-il point entre le disque du Soleil et la Terre, et n'eût-on pas dû en avoir ainsi connaissance?

« Telles sont les objections qu'on peut faire à l'hypothèse d'une planète unique, comparable à Mercure pour les dimensions et circulant en dedans de l'orbite de cette planète. Ceux à qui ces objections paraissent trop graves seront conduits à remplacer cette planète unique par une série d'astéroïdes, dont les actions produiront en somme le même effet total sur le périhélie de Mercure. Outre que ces astéroïdes ne seront pas visibles dans les circonstances ordinaires, leur répartition autour du Soleil sera cause qu'ils n'introduiront dans le mouvement de Mercure aucune inégalité périodique de quelque importance.

« L'hypothèse à laquelle nous nous trouvons ainsi amenés n'a plus rien d'excessif. Un groupe d'astéroïdes se trouve entre Jupiter et Mars, et sans doute on n'a pu en signaler que les principaux individus. Il y a lieu de croire même que l'espace planétaire contient de très petits corps en nombre illimité, circulant autour du Soleil. Pour la région qui avoisine l'orbite de la Terre, cela est certain.

« La suite des observations de Mercure montrera s'il faut définitivement admettre que de tels groupes d'astéroïdes existent aussi plus près du Soleil. Dans tous les cas, comme il se pourrait qu'au milieu de ces astéroïdes il en existât quelques-uns de plus gros que les autres et qu'on n'aurait d'autres moyens d'en constater l'existence que par l'observation de leurs passages devant le disque solaire, la discussion présente devra confirmer les astronomes dans le zèle qu'ils mettent à étudier chaque jour la surface du Soleil. Il est fort important que toute tache régulière, quelque minime qu'elle soit, et qui viendrait à paraître sur le disque du Soleil, soit suivie pendant quelques instants avec la plus grande attention, afin de s'assurer de sa nature par la connaissance de son mouvement. »

A partir de cette époque et sous l'influence de Le Verrier, de nombreux astronomes étudièrent le Soleil, espérant y découvrir les passages de planètes intramercurielles. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces observations. Disons seulement qu'en 1859, une observation célèbre conduisit Le Verrier à admettre l'existence d'une petite planète, qu'il nomma Vulcain, et dont la masse devait



LE VERRIER (1811-1877)
Astronome français.
Né à Saint-Lô (Manche), mort à Paris.

être environ le 1/17 de celle de Mercure. Ce corps du reste était beaucoup trop petit pour produire, à lui seul, les irrégularités signalées dans le mouvement de Mercure ; il aurait fallu environ 20 masses égales à celle-là pour produire l'effet voulu. D'autres observations conduisirent à penser que le corps en question opérait sa révolution en 42 jours environ. De nouvelles discussions, jointes à d'autres études de la surface solaire, montrèrent enfin à Le Verrier que le problème était indéterminé entre certaines limites et que 4 orbites différentes pouvaient rendre compte des phénomènes d'une manière assez satisfaisante, avec une préférence cependant pour le nombre 33 jours,02.

Les observations les plus récentes n'ont rien apporté de bien nouveau à la solution du problème, et voici quelles sont à ce sujet les conclusions de Tisserand (1) :

« 1° Il nous semble qu'il faut renoncer à l'hypothèse d'une planète unique produisant les dérangements constatés dans le mouvement de Mercure ; cela paraît résulter de l'ensemble des observations faites pendant les éclipses de Soleil, et en particulier pendant celle du 29 juillet 1878.

« 2° S'il existe des planètes intramercurielles comparables par leurs dimensions au corps que M. Lescarbault a vu passer (2) devant le Soleil, ces planètes doivent être en très petit nombre ; autrement elles n'auraient pu échapper aux investigations d'astronomes tels que Canington et Spörer, décrivant et mesurant les moindres taches qui paraissent à sa surface.

« 3° Ces planètes ne sauraient produire, à elles seules, les perturbations du mouvement de Mercure ; ..... on est porté à penser qu'il faudrait un très grand nombre de corps semblables pour produire sur Mercure l'effet voulu.

« 4° Il convient encore de revenir à l'idée émise tout d'abord par Le Verrier, savoir qu'il existe un anneau d'astéroïdes entre Mercure et le Soleil ; les raisons théoriques qui militent en faveur de cet anneau n'ont rien perdu de leur force. Seulement Le Verrier avait ajouté que peut-être quelques-uns de ces astéroïdes seraient assez gros pour être observés dans leurs passages sur le Soleil, ou à la fa-

(1) Notice sur les planètes intramercurielles, *Annuaire du Bureau des Longitudes.*

(2) La planète nommée Vulcain, en 1859.

veur des éclipses totales; c'était là une hypothèse, et il nous semble impossible de prononcer sur elle un jugement définitif, en partant des observations faites jusqu'ici.

« Il sera utile de fouiller encore les régions voisines du Soleil dans les éclipses totales; M. Tadd a fait récemment une proposition intéressante en vue de rendre ces recherches plus profitables. M. Tadd remarque d'abord que, si elles n'ont pas donné de résultats satisfaisants, cela tient surtout à ce que l'intervalle de temps pendant lequel on peut observer est trop court. Ainsi supposons un même astronome observant les éclipses totales de Soleil durant un siècle entier; la somme des moments pendant lesquels il pourra se livrer à la recherche des planètes intramercurielles ne sera guère que d'une heure! C'est bien peu; on doit chercher à augmenter la durée des observations, en utilisant le concours de plusieurs astronomes.

« Considérons une éclipse totale de Soleil et, à la surface de la Terre, la ligne de l'éclipse centrale; supposons deux observateurs A et B, placés en deux points éloignés sur cette ligne; l'éclipse totale n'aura pas lieu au même instant en A et B; il pourra s'écouler plusieurs heures entre les moments où A et B verront disparaître entièrement la lumière du Soleil. Admettons que les deux observateurs aient la faculté de communiquer par le télégraphe. Si le premier croit avoir découvert une planète intramercurielle, il le signalera immédiatement au second, en lui envoyant la position approchée de l'astre; ce second astronome pourra diriger à l'avance sa lunette sur la planète supposée et déterminer sa position. Le second observateur pourrait également communiquer avec un troisième, etc.; telle est la proposition de M. Tadd; on voit qu'elle aurait pour résultat de multiplier la durée des observations par le nombre des observateurs. »

Étoiles doubles. — La loi de Newton qui avait rendu de si magnifiques services dans l'étude du système solaire, il était réservé au XIXe siècle d'en montrer la véritable universalité. Par une généralisation hardie, Newton avait supposé que toutes les masses sans exception s'attirent en raison directe du produit des masses et en

raison inverse du carré des distances; le résultat avait été au-dessus de toute contestation pour les planètes, mais aucune expérience directe ne permettait d'affirmer que la loi vaut encore pour les étoiles.

L'observation des étoiles doubles fit entrer la question dans une phase nouvelle. On nomme ainsi deux étoiles très voisines sur la sphère céleste. Les deux étoiles qui composent une étoile double pourraient être en réalité fort éloignées l'une de l'autre; nous n'avons directement aucune occasion de nous en rendre compte, puisque la distance des étoiles nous est généralement inconnue: pourtant le nombre considérable d'étoiles de ce genre avait porté Herschel à penser que cette connexion apparente ne devait pas être purement fortuite. La démonstration irréfutable de cette hypothèse fut donnée plus tard par le même astronome qui reconnut que les deux étoiles simples qui forment le groupe binaire tournent l'une autour de l'autre, la petite autour de la grande. Ainsi la révolution est de 17 ans pour l'étoile double Pégase, de 35 ans pour Hercule, de 180 ans pour la Vierge. On a pu reconnaître aussi que l'orbite apparente est une ellipse et que le rayon vecteur, mené de l'étoile principale au satellite, décrit des aires proportionnelles au temps. Les lois de Képler se trouvent ainsi vérifiées pour ces systèmes; on peut alors remonter à la loi de Newton et on arrive à cette conclusion que les deux composantes de l'étoile double s'attirent mutuellement suivant la loi de la gravitation qui mérite ainsi d'être appelée universelle.





IV. — LA MESURE DES MASSES

« Il y a une vingtaine d'années (1), à la fin d'une visite publique à l'Observatoire, une personne qui avait écouté attentivement toutes les explications données sur les divers instruments fit la réflexion suivante : « Vous nous avez bien « montré les instruments propres à mesurer le temps et les « angles, mais je n'ai vu nulle part ceux qui servent à la « mesure des distances des planètes. » La question était moins naïve qu'elle ne le semblait d'abord, et, pour y répondre complètement, il aurait fallu expliquer que le problème ne peut être résolu que d'une manière indirecte, et qu'une solution précise n'est devenue possible qu'après les découvertes de Copernic et de Képler, qui ont permis d'exprimer toutes les distances du système solaire au moyen de l'une d'entre elles, la distance du Soleil à la Terre. Cette distance peut elle-même être mesurée en rayons terrestres, mais non sans peine, comme le savent particulièrement les astronomes qui ont pris part aux observations des deux derniers passages de Vénus.

« Notre visiteur aurait été encore plus indiscret s'il nous avait demandé à voir les instruments qui servent à peser le Soleil et les planètes; c'est cependant une conséquence assez simple de la loi de Newton. Ce beau résultat est un de ceux qui frappent le plus les personnes étrangères à l'Astronomie, et il n'est pas facile de le leur faire toucher du doigt, au moins dans une conversation improvisée. »

Rappelons d'abord quelques principes simples. La Mécanique élémentaire nous apprend qu'en général l'accélération imprimée à

(1) TISSERAND, Notice sur la mesure des masses en Astronomie. (*Annuaire du Bureau des Longitudes*.)

un corps est proportionnelle à la masse du corps qui l'attire. Supposons qu'un corps *A* imprime à un corps *a* une accélération égale à 1; supposons, d'autre part, qu'un corps *B* imprime à la même masse *a*, placée toujours à la même distance, une accélération égale à 2; on en concluera que la masse *B* est le double de celle de *A*.

« Supposons pour un moment qu'on puisse placer un même corps en même temps successivement à la même distance du Soleil et de la Terre; il sera attiré vers ces deux astres par des forces qui seront proportionnelles à leurs masses : cela est une conséquence de la loi de Newton et de ce que la distance est la même. »

En effet, si dans la formule :

$$F = f\frac{M\,m}{r^2},$$

on suppose *m* et *r* constants, comme cela a lieu ici, puisqu'il s'agit du même corps d'épreuve et de la même distance au Soleil et à la Terre, on voit que la force est proportionnelle à la masse du corps qui attire.

« Les accélérations seront proportionnelles aux masses du Soleil et de la Terre, et il en sera de même des espaces parcourus dans les deux cas pendant la première seconde de chute. Ainsi, si le corps qui sert d'épreuve parcourt 330 mètres en tombant vers le Soleil et 1 millimètre en tombant vers la Terre, et cela pendant la première seconde de chute, on en conclura que la masse du Soleil est 330000 fois plus grande que celle de la Terre. Mais il n'est pas nécessaire de placer le corps d'épreuve à la même distance du Soleil et de la Terre, car si on le suppose par exemple dix fois plus près de la Terre que du Soleil, il suffira de diviser sa chute sur la Terre par le carré de 10, c'est-à-dire par 100, pour savoir ce qu'elle aurait été dans le premier cas. »

D'après la loi de Newton en effet, lorsque la distance diminue, la force d'attraction augmente; si la distance est devenue 10 fois plus petite, la force est non pas 10 fois, mais 100 fois plus grande; par conséquent la chute du corps d'épreuve en une première seconde sera 100 fois plus considérable, et inversement, à une distance 10 fois plus grande, elle eût été 100 fois plus petite.

« Eh bien ! prenons pour corps d'épreuve la lune ; il nous suffira de trouver combien la Lune tomberait sur la Terre ou sur le Soleil, si on l'abandonnait librement à elle-même dans les deux cas. Nous n'avons pas encore la possibilité de réaliser cette hypothèse ; toutefois la question a fait un pas important, et il ne nous reste plus à vaincre qu'une dernière difficulté.

« Soit O la Terre (*fig.* 4), AC l'orbite que la Lune décrit autour d'elle, A sa position sur cet orbite à un moment quelconque, AB sa vitesse à cet instant, et C la position qu'occupe la Lune une seconde après avoir passé en A. A partir du point A, le mouvement est déterminé par la combinaison de deux influences : la vitesse que la Lune possède au point A, et l'attraction que la Terre exerce sur elle ; nous aurons le même résultat en faisant agir séparément les deux influences. Si l'attraction de la Terre était supprimée, la Lune se mouvrait suivant la tangente à son orbite et, au bout d'une seconde, elle serait en B. Faisons agir maintenant l'attraction sur la Lune partant du point B sans vitesse ; elle ne pourra avoir pour effet que de l'amener en C, point où elle se trouve réellement une seconde après avoir passé en A. On peut donc dire que, sous l'influence de l'attraction de la Terre, la Lune, partant de B sans vitesse, est tombée sur la Terre de la quantité BC pendant la première seconde. Quand on suppose, ce qui est voisin de la réalité, que l'orbite de la Lune est un cercle, le calcul de la petite longueur BC est des plus simples ; il n'est pas difficile non plus si l'on veut avoir égard à la forme elliptique de l'orbite ; nous ne nous y arrêterons pas.

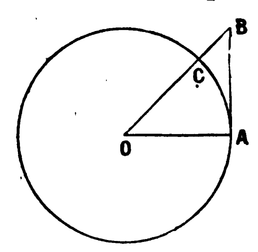


Fig. 4. — Explication géométrique du problème des masses.

« Il faut maintenant trouver la quantité dont la Lune tomberait sur le Soleil en une seconde ; mais à cause de la proximité de la Lune et de la Terre, on peut se borner à prendre la quantité dont la Terre tombe sur le Soleil en une

seconde, ce qui se fera par un calcul tout pareil au précédent, en supposant que, dans la figure 4, O représente maintenant le Soleil et A la Terre. On pourrait objecter que c'est la Lune elle-même et non pas la Terre dont il faudrait déterminer la chute, mais cela ne présente aucun inconvénient, car la chute est la même, quelle que soit la masse du corps qui tombe. C'est comme quand il s'agit de la pesanteur, sous l'influence de laquelle tous les corps tombent dans le vide avec la même vitesse.

« On trouve, en supposant les orbites circulaires, qu'en une minute la Terre tombe sur le Soleil de $10^{m},60$, et la Lune sur la Terre de $4^{m},90$; mais la Lune est en moyenne 386 fois plus rapprochée de nous que le Soleil ; si elle était aussi éloignée que le Soleil, elle ne tomberait sur la Terre que d'une quantité égale à $4^{m},90$ divisés par le carré de 386, ce qui donne $0^{m},000\,0328$. Donc la masse du Soleil est égale à celle de la Terre multipliée par le nombre

$$\frac{10,6}{0,0000\,328} = 323\,000.$$

Ainsi la masse du Soleil est 323000 plus grande que celle de la Terre. On remarquera que, pour faire le calcul ci-dessus, on est obligé de supposer connu le rapport des distances de la Terre au Soleil et à la Lune, et, par suite, la distance du Soleil à la Terre (1) ; suivant que, pour cette dernière, on adoptera tel ou tel nombre, on trouvera des valeurs différentes pour le rapport de la masse de la Terre à celle du Soleil. »

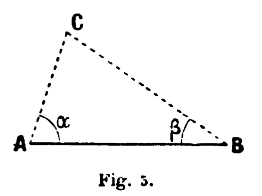


Fig. 5.

Des considérations analogues, dans lesquelles nous ne pouvons entrer, ont conduit à exprimer les masses de toutes les planètes en

(1) Voici le principe qui sert de base au calcul des distances ; il est tiré de la trigonométrie élémentaire. Quand on veut mesurer la distance d'un objet inaccessible C (*fig.* 5), on prend une base AB de longueur connue ; à chacune des extrémités de cette base, on mesure les angles α et β ; la résolution du triangle ABC donne ensuite les distances inconnues AC et BC.

C'est en somme ce que l'on a fait pour la Lune, en prenant pour A et B deux points éloignés de la surface de la Terre.

fonction de celle de la Terre prise comme unité. On a obtenu les chiffres contenus dans le tableau suivant :

Mercure . . .	1/16.	Mars	1/10.	Uranus. . .	14.
Vénus	4/5.	Jupiter. . . .	310.	Neptune . .	17.
La Terre. . .	1.	Saturne . . .	93.	Le Soleil. .	324 000.

« Il nous reste à exprimer toutes ces masses au moyen de celle d'un corps déterminé, parmi ceux que nous pouvons manier à la surface de la Terre, et qui aura nécessairement des dimensions très petites, par exemple une petite sphère en plomb. Il nous suffira de savoir combien de fois cette petite masse est contenue dans celle de la Terre; nous pourrons remonter ensuite à la plus petite des planètes, Mercure, à la plus grosse, Jupiter, et enfin au Soleil lui-même. De la sorte, toutes les masses du système planétaire auront été comparées à une masse connue placée sous nos yeux.

« Le problème qu'on vient de poser a été résolu par l'expérience célèbre dans laquelle Cavendish a réussi à mettre en évidence l'attraction infinitésimale exercée à la surface de la Terre par une sphère en plomb pesant 158 kilogrammes sur une petite balle placée dans son voisinage. Il a déduit de ses expériences la valeur de cette attraction, et, en la comparant au poids de la balle qui représente à fort peu près l'attraction exercée sur cette balle par toute la Terre, il a pu dire combien de fois la masse de la Terre contenait celle de la sphère de plomb. Il est inutile d'écrire ce rapport, qui serait exprimé par un nombre entier renfermant 23 chiffres et n'offrirait à l'esprit aucune représentation précise. On préfère, en supposant une distribution fictive uniforme de la matière dans tout le globe terrestre, dire combien de fois la masse d'un volume déterminé de cette agglomération contient la masse d'un volume égal de plomb, ou plutôt d'eau dans les conditions usuelles de la température.

« Le résultat des expériences de Cavendish est alors le suivant : dans la distribution fictive considérée, la masse d'un mètre cube de la Terre est égale à cinq fois et demie environ la masse d'un mètre cube d'eau. On n'a plus qu'à se représenter le volume de la Terre exprimé en mètres

cubes, pour avoir une idée nette de sa masse, comparée à celle d'un mètre cube d'eau. MM. Cornu et Baille ont repris les expériences de Cavendish, en apportant à son procédé des modifications heureuses et profitant de toutes les ressources de la Physique actuelle ; ils ont remplacé le nombre 5,48 de Cavendish par le nombre 5,56.

« Mais, diront quelques lecteurs, vous nous donnez la « masse du Soleil, celle de Jupiter ; ce sont leurs poids que « nous demandons. » La réponse est facile : il n'y a qu'à conserver les mêmes nombres. On aura ainsi les poids de la Terre, du Soleil et des planètes en fonction du poids de 1 mètre cube d'eau pris pour unité.

« Il faut convenir cependant qu'il paraît singulier de parler du poids de la Terre, puisque c'est elle-même qui produit l'attraction et donne lieu aux poids des corps à sa surface. Mais on peut concevoir qu'on découpe la terre en mètres cubes, qu'on apporte chacun d'eux sur le plateau d'une balance, qu'on l'équilibre avec des poids connus, et qu'ensuite on le reporte là où on l'avait pris; on fera de même pour tous les autres mètres cubes, et l'on arrivera ainsi à peser la Terre par fractions. La somme des poids sera précisément celle qui résulte des expériences de Cavendish. De même, on peut supposer par la pensée qu'on transporte ainsi successivement tous les mètres cubes dont se compose Jupiter dans le plateau de notre balance ; on arrivera à peser Jupiter, et l'on trouvera le nombre qui résulte de ce qu'on a dit plus haut.

« On est donc en droit de dire que l'on arrive à peser en kilogrammes la Terre, les planètes et le Soleil. »

On a aussi, en se fondant sur les mouvements réciproques des étoiles doubles, dont la distance à la Terre est connue, obtenu le tableau suivant, en prenant comme unité la masse du Soleil :

Centaure	1,8.	Aphineus	2,5.
Cassiopée. . . .	8,3.	Eridan	1,5.

« N'est-ce pas là, ajoute Tisserand, un magnifique résultat, fournissant la preuve directe que les étoiles sont toutes des soleils comparables au nôtre, et qu'inversement le Soleil

n'est qu'une étoile, pas plus importante que celles qui figurent dans les classes inférieures de nos catalogues!

« Pendant des siècles, on a fait de la Terre le centre du monde, en obligeant les planètes, le Soleil et jusqu'aux étoiles, à tourner autour d'elle. Copernic est survenu, et dès lors la Terre a pris une place des plus modestes dans le cortège des planètes que dirige le Soleil. Voici maintenant que le Soleil à son tour n'est plus qu'une des innombrables étoiles de la Voie lactée, et cette Voie lactée n'est sans doute elle-même qu'un des amas stellaires répandus à profusion dans l'espace. C'est ainsi que les découvertes successives ont singulièrement diminué l'importance de la Terre dans l'ensemble de la création. L'homme pourrait en concevoir quelque chagrin; mais il a de quoi se consoler en opposant à sa faiblesse physique la grandeur et la beauté des résultats obtenus par son intelligence, notamment dans le domaine de l'Astronomie : la détermination des poids des corps célestes et celle de leur composition par l'analyse spectrale. »

Conclusion.

Après cette rapide revue d'ensemble des principaux résultats de la Mécanique céleste au XIXe siècle, il nous est possible de mieux nous rendre compte de sa nature; c'est dans toute la force du terme une *science rationnelle.* Citons encore Laplace dans son Introduction au *Traité de Mécanique céleste :*

« Newton publia, vers la fin du dernier siècle, la découverte de la pesanteur universelle. Depuis cette époque, les géomètres sont parvenus à ramener à cette grande loi de la nature tous les phénomènes connus du système du monde, et à donner ainsi aux théories et aux tables astronomiques une précision inespérée. Je me propose de présenter sous un même point de vue ces théories éparses dans un grand nombre d'ouvrages, et dont l'ensemble, embrassant tous les résultats de la gravitation universelle sur l'équilibre et sur les mouvements des corps solides et fluides qui composent le système solaire et les systèmes semblables répandus dans l'immensité des cieux, forme la Mécanique céleste. L'Astronomie, considérée de la manière la plus générale, est un

grand problème de Mécanique, dont les éléments des mouvements célestes sont les arbitraires; sa solution dépend à la fois de l'exactitude des observations et de la perfection de l'analyse, et *il importe extrêmement d'en bannir tout empirisme et de la réduire à n'emprunter de l'observation que les données indispensables.* »

Nous avons indiqué en italique à dessein cette expression : « *d'en bannir tout empirisme.* » Qu'est-ce donc que l'empirisme en matière scientifique, et n'y a-t-il pas quelque chose d'étrange à parler de loi rationnelle, comme si toutes les lois ne dérivaient pas de la constatation des faits? Ces mots ont pourtant un sens bien défini. Une loi est rationnelle si elle comporte deux caractères. D'abord il faut qu'elle soit précise, ou du moins très approchée; il est nécessaire ensuite qu'elle se rattache, par une déduction quelconque, à l'ensemble des lois connues touchant les phénomènes qu'elle exprime, autrement dit qu'elle fasse partie d'une système.

La loi de Bode (Voir p. 25) n'a aucun de ces caractères; elle manque de précision ; elle ne se rattache à aucune autre loi astronomique et n'a point par conséquent de fondement théorique : aussi l'appelle-t-on empirique. La découverte de Neptune est venue d'ailleurs en montrer le peu de valeur scientifique. Au contraire tous les théorèmes de la Mécanique céleste se déduisent de la *loi de Newton*, et il est exact de dire, en reprenant une idée chère à Leibniz, qu'un esprit assez puissant pourrait lire dans cette loi tout l'ensemble, jusqu'en ses plus infimes détails, de l'Astronomie mathématique. Voilà vraiment une science rationnelle, puisque le propre de la raison c'est l'ordre, l'unité dans la variété. Disons enfin qu'on voit ici, mieux que partout ailleurs, que la science ne consiste point en un stérile entassement de faits; s'il n'y avait point en face de l'expérience, qui ne peut jamais jouer qu'un rôle indicateur, une raison qui crée les théories et enchaîne déductivement les phénomènes, après les avoir, selon l'idée de Descartes, décomposés en leurs principes simples, il y aurait peut-être pour l'humanité des sensations agréables, des habitudes utiles à la vie, mais il n'existerait pas de Science, au vrai sens du mot.

A la Mécanique céleste mieux qu'à toute autre science s'appliqueraient ces paroles célèbres de Taine (1), dont le ton dithyrambique fait un peu sourire aujourd'hui, mais qui ont du moins le mérite d'indiquer le caractère fondamental de la science véritable, l'unité des principes dans la diversité des explications :

« Au suprême sommet des choses, au plus haut de l'éther lumineux et inaccessible, se prononce l'axiome éternel, et le

(1) *Les Philosophes classiques au* XIX*e* *siècle*, p. 370, 6e édit.

retentissement prolongé de cette formule créatrice compose, par des ondulations inépuisables, l'immensité de l'Univers. Toute forme, tout changement, tout mouvement, toute idée est un de ses actes. Elle subsiste en toutes choses et n'est bornée par aucune chose. La matière et la pensée, la planète et l'homme, les entassements de soleils et les palpitations d'un insecte, la vie et la mort, la douleur et la joie, il n'est rien qui ne l'exprime, et il n'est rien qui l'exprime tout entière. Elle remplit le temps et l'espace et reste au-dessus du temps et de l'espace. Elle n'est point comprise en eux, et ils dérivent d'elle. Toute vie est un de ses moments, tout être est une de ses formes; et les séries des choses descendent d'elles, selon des nécessités indestructibles, reliées par les divins anneaux de sa chaîne d'or. »

Terminons enfin en signalant le caractère esthétique d'une pareille science, affirmation familière aux savants, mais qui choquera certainement les personnes étrangères à ces spéculations abstraites. C'est qu'il existe plusieurs sortes de beautés, depuis la beauté sensible qui résulte d'une heureuse synthèse de sensations, jusqu'à la beauté proprement intellectuelle, qui comporte l'harmonie des formes et la systématisation des idées. Voici à ce propos les belles paroles d'un physicien contemporain, M. Duhem, sur la valeur esthétique des connaissances scientifiques :

« Partout où l'ordre règne, il amène avec lui la beauté; la théorie ne rend donc pas seulement l'ensemble des lois physiques qu'elle représente plus aisé à manier, plus commode, plus utile; elle le rend aussi plus beau. Il est impossible de suivre la marche d'une des grandes théories de la Physique, de la voir dérouler majestueusement, à partir des premières hypothèses, ses déductions régulières; de voir ses conséquences représenter, jusque dans le moindre détail, une foule de lois expérimentales, sans être séduit par la beauté d'une semblable construction, sans éprouver qu'une telle création de l'esprit humain est vraiment une œuvre d'art. »



DEUXIÈME PARTIE

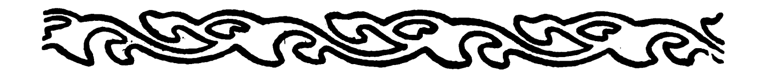
ÉVOLUTION DU SYSTÈME SOLAIRE

Nous avons jusqu'ici étudié l'Astronomie telle que les mathématiques nous permettent de nous la représenter. La loi de Newton en forme le faîte. Nous y avons rencontré un caractère de rationalité et de précision que l'on chercherait en vain dans les autres sciences dont les approximations enserrent beaucoup moins le réel et dont les théories demeurent, jusqu'ici du moins, relativement isolées. Mais ce système qui constitue notre monde planétaire est-il absolument stable? Deux illustres astronomes, Newton et Laplace, l'avaient pensé, à des points de vue différents d'ailleurs.

Newton s'était demandé si l'on ne pourrait pas, suivant les lois de la Mécanique céleste, faire dériver l'état présent du système solaire d'un état différent au point de vue de la configuration et de la répartition réciproque des masses.

Sa conclusion avait été négative; notre système solaire avait dû sortir tel quel des mains du Créateur. Affirmation qui fut contestée d'abord par Kant, puis ruinée définitivement par Laplace, qui énonça à ce sujet une théorie célèbre connue sous le nom d'*Hypothèse de la Nébuleuse*. Mais il admit à son tour la stabilité dans l'avenir du système solaire. La démonstration mathématique qu'il en donna, et à laquelle nous avons fait allusion plus haut, constitue un de ses plus beaux titres de gloire. Les découvertes de la physique moderne ont fait concevoir des doutes sur la valeur réelle de cette démonstration; il est à peu près certain aujourd'hui qu'elle n'a qu'une valeur de haute approximation.

Nous exposerons d'abord la théorie cosmogonique de Laplace, plus connue sous le nom d'Hypothèse de la Nébuleuse; puis nous citerons les réflexions qu'a suscitées aux savants modernes, sur le sujet qui nous occupe, l'état de la physique contemporaine.



V. — HYPOTHÈSE COSMOGONIQUE DE LAPLACE

« On a, pour remonter à la cause des mouvements primitifs du système planétaire (1), les cinq phénomènes suivants : les *mouvements des planètes* dans le même sens et à peu près dans un même plan; les *mouvements des satellites* dans le même sens que ceux des planètes; les *mouvements de rotation de ces différents corps et du Soleil*, dans le même sens que leurs mouvements de projection et dans des plans peu différents; le *peu d'excentricité des orbes des planètes et des satellites;* enfin, la grande *excentricité des orbes des comètes,* quoique leurs inclinaisons aient été abandonnées au hasard.

« Buffon est le seul que je connaisse, qui, depuis la découverte du vrai système du monde, ait essayé de remonter à l'origine des planètes et des satellites (2). Il suppose qu'une Comète, en tombant sur le Soleil, en a chassé un torrent de matière qui s'est réuni au loin, en divers globes plus ou moins grands et plus ou moins éloignés de cet astre; ces globes, devenus par leur refroidissement opaques et solides, sont les planètes et leurs satellites. »

Cette hypothèse est inadmissible, et pour plusieurs raisons, surtout parce que la petitesse de la masse des comètes ne permettrait pas à l'une d'elles d'enlever du Soleil une quantité de matière égale à la masse totale des planètes.

Un tel concours de circonstances ne saurait être l'œuvre du hasard; il faut qu'une cause générale ait dirigé tous ces mouvements. Laplace évalue la probabilité pour que les 42 mouvements

---

(1) Laplace, *Système du monde*.

(2) Laplace oublie de mentionner ici le philosophe allemand Kant; celui-ci avait, dans un ouvrage intitulé *Théorie du ciel* (1755), formulé une hypothèse intéressante sur l'origine du Système solaire. Certaines théories, postérieures à celles de Laplace, s'en sont partiellement inspirées.



DE LAPLACE (1749-1827)
Astronome français.
Né à Beaumont-en-Auge (Calvados), mort à Paris.

Estampe de la Bibl. nat.

connus de son temps — mouvements de révolution et de rotation du Soleil, des planètes et de leurs satellites — soient directs, quand on les rapporte à la position de l'équateur solaire. Il trouve plus de quatre mille milliards à parier contre un que cette disposition n'est point l'effet du hasard. Probabilité singulièrement accrue depuis les découvertes modernes des nouvelles planètes télescopiques et de Neptune.

« Quelle que soit la nature de cette cause, puisqu'elle a produit ou dirigé les mouvements des planètes, il faut qu'elle ait embrassé tous ces corps et, vu la distance prodigieuse qui les sépare, elle ne peut avoir été qu'un fluide d'une immense étendue. Pour leur avoir donné dans le même sens un mouvement presque circulaire autour du Soleil, il faut que ce fluide ait environné cet astre comme une atmosphère. La considération des mouvements planétaires nous conduit donc à penser qu'en vertu d'une chaleur excessive l'atmosphère du Soleil s'est primitivement étendue au delà des orbes de toutes les planètes et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles.

« Dans l'état primitif où nous supposons le Soleil, il ressemblait aux nébuleuses que le télescope nous montre composées d'un noyau plus ou moins brillant, entouré d'une nébulosité qui, en se condensant à la surface du noyau, la transforme en étoile. Si l'on conçoit par analogie toutes les étoiles formées de cette manière, on peut imaginer leur état antérieur de nébulosité précédé lui-même par d'autres états dans lesquels la matière nébuleuse était de plus en plus diffuse, le noyau étant de moins en moins lumineux.

« On arrive ainsi, en remontant aussi loin qu'il est possible, à une nébulosité tellement diffuse que l'on pourrait à peine en soupçonner l'existence. »

« ..... Herschel, en observant les nébuleuses au moyen de ses puissants télescopes, a suivi les progrès de leur condensation, non sur une seule, ces progrès ne pouvant devenir pour nous sensibles qu'après des siècles, mais sur leur ensemble, comme on suit dans une vaste forêt l'accroissement des arbres sur les individus des divers âges qu'elle renferme. Il a d'abord observé la matière nébuleuse répandue en amas

divers dans les différentes parties du ciel dont elle occupe une grande étendue. Il a vu, dans quelques-uns de ces amas, cette matière faiblement condensée autour d'un ou de plusieurs noyaux peu brillants. Dans d'autres nébuleuses, ces noyaux brillent davantage relativement à la nébulosité qui les environne. Les atmosphères de chaque noyau venant à se séparer par une condensation ultérieure, il en résulte des nébuleuses multiples, formées de noyaux brillants, très voisins et environnés chacun d'une atmosphère; quelquefois, la matière nébuleuse, en se condensant d'une manière uniforme, produit les nébuleuses que l'on appelle planétaires. Enfin, un plus grand degré de condensation transforme toutes ces nébuleuses en étoiles. Les nébuleuses classées d'après cette vue philosophique indiquent avec une extrême vraisemblance leur transformation future en étoiles et l'état antérieur de nébulosité des étoiles existantes. Ainsi l'on descend, par le progrès de la condensation de la matière nébuleuse, à la considération du Soleil entouré autrefois d'une vaste atmosphère, considération à laquelle je suis remonté par l'examen des phénomènes du système solaire. Une rencontre aussi remarquable, en suivant des routes opposées, donne à l'existence de cet état antérieur du Soleil une grande probabilité..... »

« Mais comment l'atmosphère solaire a-t-elle déterminé les mouvements de rotation et de révolution des planètes et des satellites? Si ces corps avaient pénétré profondément dans cette atmosphère, sa résistance les aurait fait tomber sur le Soleil (1); on peut donc conjecturer que les planètes ont été formées, à ces limites successives, par la condensation des zones de vapeurs, qu'elle a dû, en se refroidissant, abandonner dans le plan de son équateur..... »

En effet :

« L'atmosphère du Soleil ne peut pas s'étendre indéfiniment; sa limite est le point où la force centrifuge due à

(1) En effet, la vitesse diminuant par suite de la résistance du milieu, la force centrifuge diminuerait aussi et, par suite, l'attraction devenant prépondérante, les masses auraient fini par se précipiter sur le Soleil.

son mouvement de rotation balance la pesanteur (1); or, à mesure que le refroidissement resserre l'atmosphère et condense à la surface de l'astre les molécules qui en sont voisines, le mouvement de rotation augmente; car en vertu du principe des aires (2), la somme des aires décrites par le rayon vecteur de chaque molécule du Soleil et de son atmosphère et projetées sur le plan de son équateur, étant toujours la même, la rotation doit être plus prompte quand ces molécules se rapprochent du centre du Soleil. La force centrifuge due à ce mouvement devenant ainsi plus grande, le point où la pesanteur lui est égale est plus près de ce centre. En supposant donc, ce qu'il est naturel d'admettre, que l'atmosphère s'est étendue à une époque quelconque jusqu'à sa limite, elle a dû, en se refroidissant, abandonner les molécules situées à cette limite et aux limites successives produites par l'accroissement de la rotation du Soleil. Ces molécules abandonnées ont continué de circuler autour de cet astre, puisque leur force centrifuge était balancée par la pesanteur.

« Si toutes les molécules d'un anneau de vapeurs continuaient de se condenser sans se désunir, elles formeraient à la longue un anneau liquide ou solide. Mais la régularité que cette formation exige dans toutes les parties de l'anneau

---

(1) On peut facilement calculer cette limite; appelons r la vitesse angulaire de rotation du système, c'est-à-dire, en supposant ce mouvement uniforme, l'angle dont le rayon vecteur d'une molécule quelconque (distance de cette molécule à l'axe de rotation) tourne en une seconde; et soit d la limite cherchée. La mécanique montre que la force centrifuge est, à cette limite, égale à $r^2 d$.

D'autre part, l'attraction sur l'unité de masse à la distance d peut être, d'après la loi de Newton, en appelant M la masse totale du système, représentée par $\frac{M}{d^2}$. En écrivant que ces deux forces s'égalent en d, on a :

$$r^2 d = \frac{M}{d^2}.$$

D'où l'on tire

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{r^2}}.$$

On voit donc que si r augmente, d diminue et que par conséquent, comme le dit Laplace, des zones successives de vapeurs doivent se trouver, en vertu de la force centrifuge, soustraites à l'attraction de la masse centrale.

(2) *Voir plus haut*, p. 12. — Puisque les aires balayées pendant l'unité de temps doivent toujours être égales, on voit qu'à mesure qu'une molécule se rapproche du Soleil, son rayon vecteur doit tourner de plus en plus vite.

et dans leur refroidissement a dû rendre ce phénomène extrêmement rare. Aussi le système solaire n'en offre-t-il qu'un seul exemple, celui des anneaux de Saturne (*fig.* 6). Presque toujours chaque anneau de vapeurs a dû se rompre en plusieurs masses qui, mues avec des vitesses très peu différentes, ont continué de circuler à la même distance autour du Soleil. Ces masses ont dû prendre une forme sphéroïdique, avec un mouvement de rotation dirigé dans le sens de leur évolution, puisque les molécules inférieures avaient moins de vitesse réelle que les supérieures (1); elles ont donc formé autant de planètes à l'état de vapeurs. Mais si l'une d'elles a été assez puissante pour réunir successivement par son attraction toutes les autres autour de son centre, l'anneau de vapeurs aura été ainsi transformé en une seule masse sphé-

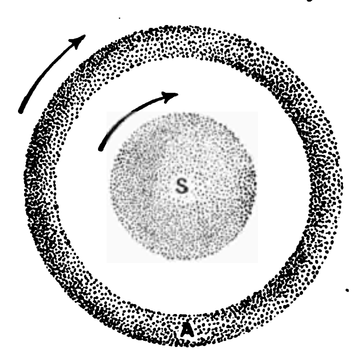


Fig. 6. — État du système solaire au moment où un premier anneau A vient, en vertu de la force centrifuge, de se détacher de la masse centrale S.

Cette phase se trouve à peu près réalisée actuellement par la planète Saturne.

(1) C'est là un point très important de la théorie destinée à expliquer ce fait remarquable que toutes les planètes (sauf Mercure) ont un mouvement de rotation sur elles-mêmes, dont la période est plus courte que celle de la leur translation autour du Soleil. Pour la Terre, comme on le sait, ce rapport est de 1/365.

Soit la planète T considérée (*fig.* 7), AM la courbe qu'elle décrit autour du Soleil. Si aucune contraction de la matière n'intervenait, la planète présenterait toujours la même face au Soleil (ce qui est réalisé d'ailleurs pour Mercure, et pour la Lune par rapport à la Terre); il n'y aurait ni jour ni nuit, mais un jour perpétuel pour une hémisphère, une nuit perpétuelle pour l'autre. Mais le refroidissement détermine une contraction; une molécule telle que *m* se rapproche du centre d'attraction *B*. En vertu de la loi des

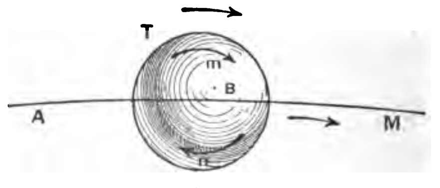


Fig. 7.

roïdique de vapeurs, circulant autour du Soleil, avec une rotation dirigée dans le sens de sa révolution. Ce dernier cas a été le plus commun : cependant, le système solaire nous offre le premier cas dans les quatre petites planètes qui se meuvent entre Jupiter et Mars.....

« Maintenant, si nous suivons les changements qu'un re-

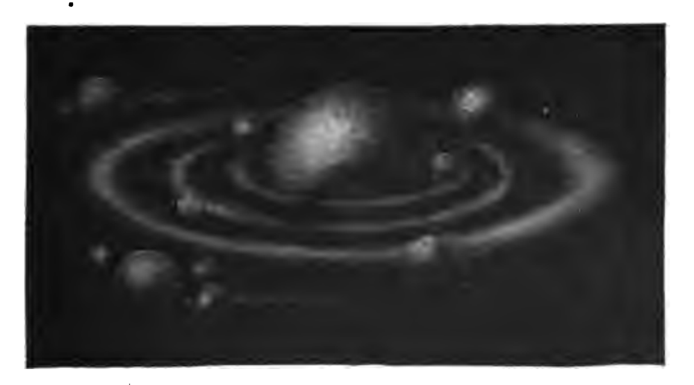


Fig. 8. — Formation du système planétaire.

froidissement ultérieur a dû produire dans les planètes en vapeurs dont nous venons de concevoir la formation, nous verrons naître au centre de chacune d'elles un noyau s'accroissant sans cesse par la condensation de l'atmosphère qui l'environne. Dans cet état, la planète ressemblait parfaitement au Soleil à l'état de nébuleuse où nous venons de le considérer; le refroidissement a donc dû produire, aux diverses limites de son atmosphère, des phénomènes sembla-

---

aires, dont nous avons parlé plus haut (V. p. 12), sa vitesse angulaire de rotation autour du Soleil va augmenter et devenir plus grande que celle de *B*. Elle prendra donc, par rapport à *B*, un mouvement indiqué par le sens de la flèche. Une raison inverse donnera à une molécule *n* qui se rapproche de *B*, en vertu de la même cause, une vitesse angulaire moindre que celle de *B*, qui la fera tourner moins vite autour du Soleil que le centre de la planète, et lui imprimera donc, par rapport à ce centre, une vitesse indiquée par le sens de la nouvelle flèche. — On voit donc que la masse totale, puisque le même raisonnement peut se répéter pour chaque molécule, va prendre un mouvement de rotation sur elle-même, du même sens que celui de la révolution générale autour du Soleil.

bles à ceux que nous avons décrits, c'est-à-dire des anneaux et des satellites, circulant autour de son centre, dans le sens de son mouvement de rotation, et tournant dans le même sens sur eux-mêmes (*fig.* 9). La distribution régulière de la masse des anneaux de Saturne autour de son centre et dans le plan de son équateur résulte naturellement de cette hypothèse et sans elle devient inexplicable; ces anneaux me paraissent être des preuves toujours subsistantes de l'extension primitive de l'atmosphère de Saturne et de ses retraites successives. Ainsi, les phénomènes singuliers du peu d'excentricité des orbes des planètes et des satellites, du peu d'inclinaison de ces orbes à l'équateur solaire et de l'identité du sens des mouvements de rotation et de révolution de tous ces corps avec celui de la rotation du Soleil, découlent de l'hypothèse que nous proposons et lui donnent une grande vraisemblance, qui peut encore être augmentée par la considération suivante :



Fig. 9. — Mode de formation d'une planète et de ses satellites.

« Tous les corps qui circulent autour d'une planète ayant été, suivant cette hypothèse, formés par les zones que son

atmosphère a successivement abandonnées, et son mouvement de rotation étant devenu de plus en plus rapide, la durée de ces mouvements doit être moindre que celle de la révolution de ces différents corps, ce qui a lieu semblablement pour le Soleil comparé aux planètes. Tout cela est confirmé par les observations. La durée de la révolution de l'anneau le plus voisin de Saturne est, suivant les observations d'Herschel, 0 j. 438, et celle de la rotation de Saturne n'est que de 0 j. 427. La différence 0 j. 011 est peu considérable, comme cela doit être, parce que la partie de l'atmosphère de Saturne que la diminution de la chaleur a déposée à la surface de cette planète depuis la formation de l'anneau, ayant été peu considérable et venant d'une petite hauteur, a dû peu augmenter la rotation de la planète.

« Si le système solaire s'était formé avec une parfaite régularité, les orbites des corps qui le composent seraient des cercles, dont les plans, ainsi que ceux des divers équateurs et des anneaux, coïncideraient avec le plan de l'équateur solaire. Mais on conçoit que les variétés sans nombre qui ont dû exister dans la température et la densité des diverses parties de ces grandes masses ont produit les excentricités de leurs orbites et les déviations de leurs mouvements du plan de cet équateur.

« Dans notre hypothèse, les comètes sont étrangères au système planétaire. En les considérant, ainsi que nous l'avons fait, comme de petites nébuleuses, errant de systèmes en systèmes solaires et formées par la condensation de la matière nébuleuse répandue avec tant de profusion dans l'univers, on voit que lorsqu'elles parviennent dans la partie de l'espace où l'attraction du Soleil est prédominante, il les force à décrire des orbes elliptiques ou hyperboliques. Mais leurs vitesses étant également possibles suivant toutes les directions, elles doivent se mouvoir indifféremment dans tous les sens et sous toutes les inclinaisons de l'écliptique, ce qui est conforme à ce que l'on observe. Ainsi la condensation de la matière nébuleuse, par laquelle nous venons d'expliquer les mouvements de rotation et de révolution des planètes et des satellites dans le même sens et sur des plans

peu différents, explique également pourquoi les mouvements des comètes s'écartent de cette loi générale.

. . . .

« L'examen approfondi de toutes les circonstances de ce système accroît encore la probabilité de notre hypothèse. La fluidité primitive des planètes est clairement indiquée par l'aplatissement de leur figure, conforme aux lois de l'attraction mutuelle de leurs molécules ; elle est, de plus, prouvée pour la Terre, par la diminution régulière de la pesanteur en allant de l'équateur au pôle. »

A cette hypothèse de Laplace, plusieurs objections ont été faites. D'abord quelques satellites sont à des distances de leur planète incompatibles avec cette hypothèse. De plus, les systèmes planétaires les plus rapprochés sont directs, tandis que les plus éloignés sont rétrogrades ; ce fait était inconnu de Laplace et sa théorie ne permet pas d'en rendre compte. Enfin on a découvert, autour de Jupiter et de Saturne, des satellites à révolution rétrograde. — C'est pour répondre à ces deux premières difficultés que Faye (qui ignorait la troisième, dont sa théorie ne peut d'ailleurs rendre compte) a imaginé une nouvelle hypothèse cosmogonique.

« L'espace, dit Faye (1), est à l'origine rempli par un chaos général excessivement rare, formé de tous les éléments de la chimie terrestre, plus ou moins mêlés et confondus. Ces matériaux, soumis d'ailleurs à leurs attractions mutuelles, étaient dès le commencement animés de mouvements divers qui en ont provoqué la séparation en lambeaux ou nuées. Ceux-ci ont conservé une translation rapide et des girations intestines plus ou moins lentes. Ces myriades de lambeaux chaotiques ont donné naissance par voie de condensation progressive aux divers mondes de l'univers. »

---

(1) FAYE (Hervé), astronome, né en 1814, est mort en 1902. Élève à l'École polytechnique en 1832, il se livra ensuite à l'industrie, puis entra à l'Observatoire sur la recommandation d'Arago.

Il fut ensuite professeur de géodésie à l'École polytechnique, de 1848 à 1854, puis nommé recteur de l'Académie de Nancy et président du Bureau des Longitudes. Il fut quelque temps ministre de l'Instruction publique, puis ne s'occupa plus que de travaux scientifiques. Ses principaux ouvrages ont trait à l'astronomie physique et à la météorologie. Dans un travail intitulé *Sur l'origine des mondes : Théories cosmogoniques des anciens et des modernes*, il a fortement critiqué le système cosmogonique de Laplace.



HERVÉ FAYE (1814-1902)
Astronome français.
Né à Saint-Benoît-du-Sault (Indre), mort à Paris.

Phot. E. Pirou.

Divers cas se produiront suivant l'intensité des mouvements giratoires et la forme des lambeaux. On aura ainsi une étoile sans satellite, ou un amas d'étoiles tournant autour d'un centre de gravité commun. Mais le cas le plus général est celui d'un amas « non

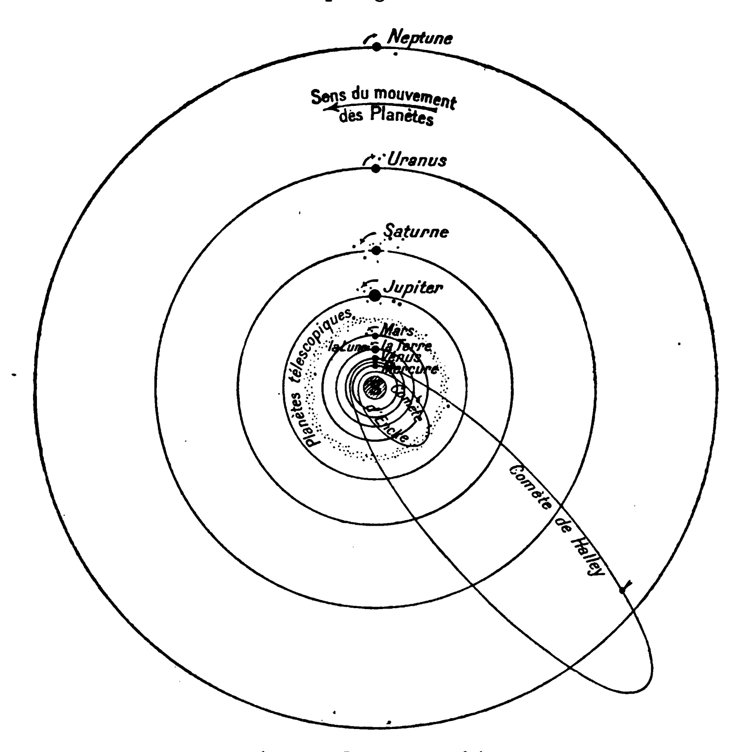


Fig. 10. — Le système solaire.

sphérique, non homogène, et animé de tourbillonnements susceptibles de se résoudre en une giration unique ».

Nous arrivons ainsi à un certain nombre de corps séparés, décrivant finalement des ellipses plus ou moins excentriques, ayant leur foyer commun ou centre de gravité. »

C'est le cas de notre système solaire, qui présente en outre cette remarquable particularité que les orbites des planètes y sont presque circulaires.

« Il faut donc que, parmi les conditions initiales de notre lambeau chaotique, il s'en soit trouvé une qui ait empêché les girations de dégénérer en mouvements elliptiques, et qui ait rectifié d'abord et fermement conservé ensuite la forme à peu près circulaire à travers toutes les péripéties. »

Nous n'insisterons pas sur les développements mécaniques que comporte cette ingénieuse hypothèse. Disons seulement qu'elle rend beaucoup moins facilement compte que celle de Laplace de la faiblesse des excentricités et des inclinaisons. Les objections à la cosmogonie de Laplace, que Faye voulait éviter, ont pu être résolues par une autre voie, sans sortir de l'idée directrice imaginée par l'illustre astronome. La théorie de Faye, d'ailleurs, ne rend pas mieux compte que celle de Laplace de l'existence du mouvement rétrograde des satellites extérieurs de Jupiter et de Saturne.

Plus récemment, *M. du Ligondès* (1) a émis une théorie qui présente quelque analogie avec celle de Kant. Primitivement le monde est comme un essaim de projectiles se croisant au hasard. Ce sont les chocs qui produisent l'évolution. D'abord a lieu une concentration progressive : deux masses, en effet, qui se rencontrent, perdent leur vitesse et peuvent être attirées par une autre masse à laquelle elles vont s'unir. Le jeu des mêmes chocs, à travers toutes sortes de transformations, dont certaines se neutralisent les unes les autres, finit par produire un système d'orbites peu excentriques et peu inclinées. On arrive ainsi à un Cosmos admirablement réglé.

Enfin, d'après *Sée* (2), les planètes ne se sont pas détachées du Soleil, pas plus que la Lune de la Terre. Ces astres ont eu de tout temps une existence individuelle. Ils ont été captés par le Soleil et par la Terre, grâce à l'atmosphère résistant de ces derniers corps, capable ainsi de diminuer la vitesse de tout astre vagabond qui y pénétrait et de rendre son orbite, d'abord hyperbolique, puis elliptique, enfin presque circulaire. Peu à peu d'ailleurs cette atmosphère s'est résorbée, par suite d'un refroidissement, et l'astre a continué à circuler d'une manière à peu près uniforme autour du Soleil ou de la Terre. Cette explication peut s'étendre à toute planète et à tout satellite en général.

Chacune de ces théories a le mérite de rendre compte de certains faits; aucune ne réussit à dissiper toutes les obscurités : pourrait-il en être autrement en un sujet si difficile? D'après H. Poincaré (3), qui a soumis ces hypothèses à une pénétrante analyse, c'est la cosmogonie de Laplace qu'on peut aujourd'hui encore considérer comme la plus vraisemblable et la plus satisfaisante pour l'esprit;

(1) *Formation mécanique du Système du monde* (1897).

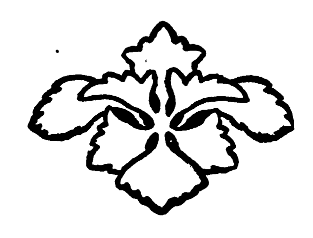
(2) *The Capture Theory of cosmical Evolution* (1910).

(3) *Les Hypothèses cosmogoniques* (1911).

et il n'est pas démontré que les faits nouveaux, qui semblent la contredire, ne pourront pas finalement être expliqués par elle.

Voici sa conclusion :

« La plus vieille hypothèse est celle de Laplace; mais sa vieillesse est vigoureuse et, pour son âge, elle n'a pas trop de rides. Malgré les objections qu'on lui a opposées, malgré les découvertes que les astronomes ont faites et qui auraient bien étonné Laplace, elle est toujours debout et c'est encore elle qui rend le mieux compte des faits : c'est elle qui répond le mieux à la question que s'était posée son auteur : pourquoi l'ordre règne-t-il dans le système solaire, si cet ordre n'est pas dû au hasard? De temps en temps une brèche s'ouvrait dans le vieil édifice; mais elle était promptement réparée et l'édifice ne tombait pas. »





VI. — STABILITÉ ET AVENIR DU SYSTÈME SOLAIRE

« Le mathématicien, dit H. Poincaré (1), ne considère que des astres fictifs réduits à de simples points matériels et soumis à l'action *exclusive* de leurs attractions mutuelles qui suit *rigoureusement* la loi de Newton.

« Comment se comporterait un pareil système; serait-il stable? C'est là un problème aussi difficile qu'intéressant pour l'analyste. Mais ce n'est pas celui qui correspond au cas de la nature.

« Les astres réels ne sont pas des points matériels et ils sont soumis à d'autres forces que l'attraction newtonienne. Ces forces complémentaires devraient avoir pour effet de modifier peu à peu les orbites, alors même que les astres fictifs envisagés par le mathématicien jouiraient de la stabilité absolue.

« Quand l'approximation sera poussée assez loin pour que nous soyons certains que les variations très lentes, que l'attraction newtonienne fait subir aux orbites des astres fictifs, ne peuvent être que très petites pendant le temps qui suffit aux forces complémentaires pour achever la destruction du système; quand, dis-je, l'approximation sera poussée jusque-là, il sera inutile d'aller plus loin, du moins au point de vue des applications, et nous devrons nous considérer comme satisfaits.

« Or il semble bien que ce point soit atteint; sans vouloir citer des chiffres, je crois que les effets des forces complémentaires sont beaucoup plus grands que ceux des termes

(1) Henri Poincaré, *Annuaire du Bureau des Longitudes* (1898).

négligés par les analystes dans les démonstrations les plus récentes de la stabilité. »

D'abord, la loi de Newton est-elle absolument exacte? Nous ne saurions le dire; mais ce qui est certain, c'est que la loi véritable ne peut pas s'éloigner beaucoup de la formule de Newton, et alors elle satisferait encore à la stabilité du système; car Jacobi a démontré que l'instabilité n'aurait lieu que si l'attraction était en raison inverse du cube de la distance; alors en effet, pour une planète qui s'éloignerait du corps central, l'attraction diminuerait rapidement et ne serait plus capable de la retenir.

Mais il y a une autre raison capable de porter atteinte à la stabilité du système solaire. Nous voulons parler de la dissipation continuelle de l'énergie mécanique et de sa transformation en énergie calorifique, suivant le principe connu en physique sous le nom de Principe de la dégradation de l'énergie ou Principe de Carnot.

Clausius a été amené à considérer, dans l'évolution d'un système thermiquement isolé, une certaine quantité, qu'il a nommée entropie. Sans insister sur sa définition, nécessairement compliquée, disons seulement qu'elle définit en quelque sorte la quantité d'énergie mécanique utilisable à chaque moment dans un système qui évolue; on démontre que pour un tel système l'entropie va sans cesse en augmentant; elle peut demeurer stationnaire, croître plus ou moins vite, suivant les réactions internes du système, mais elle ne peut jamais diminuer.

« L'entropie apparaît comme une grandeur mesurant en quelque sorte l'évolution d'un système (1), donnant tout au moins le sens de cette évolution; cette conséquence si importante n'avait certes pas échappé à Clausius, puisque le nom même d'entropie qu'il avait choisi pour désigner cette grandeur signifie lui-même cette évolution.

« M. Perrin énonce le principe suivant : un système isolé ne passe jamais deux fois par le même état. Sous cette forme, le principe affirme qu'il existe un ordre nécessaire dans la succession de deux phénomènes : l'évolution a lieu dans un sens déterminé. On peut dire, si l'on préfère, que de deux transformations inverses ne s'accompagnant d'aucun effet extérieur, une seule est possible : par exemple, deux gaz peuvent se diffuser l'un dans l'autre à volume constant, mais

(1) Lucien Poincaré, *La Physique moderne*, p. 78.

ils ne sauraient inversement se séparer d'une façon spontanée.

« On est donc amené à considérer que, dans son ensemble, le principe de Carnot se ramène à cette idée, que l'on ne peut remonter le cours de la vie, que l'évolution d'un système doit suivre sa marche nécessaire.

« Clausius et lord Kelvin ont tiré de ces considérations des conséquences bien connues sur l'évolution de l'univers; remarquant que l'entropie est une propriété additive de la matière, ils admettent qu'il y a dans le monde une entropie totale, et, comme tous les changements réels qui se produisent dans un système quelconque, correspondent à une augmentation d'entropie, on peut dire que l'entropie du monde va constamment en augmentant.

« Ainsi la quantité d'énergie qui existe dans l'univers resterait constante, mais elle se transformerait petit à petit en chaleur uniformément distribuée sous une température partout identique; il n'y aurait plus à la fin ni phénomène chimique, ni manifestation vitale : le monde existerait encore, mais il serait sans mouvement et pour ainsi dire sans vie.

« Ces conséquences sont, il faut l'avouer, fort douteuses; on ne saurait, d'une façon sûre, appliquer à l'univers, qui n'est pas un système fini, une proposition démontrée, et encore non sans réserves, dans le cas nettement limité d'un système fini. Et d'ailleurs H. Spencer a fait, dans son livre des *Premiers principes*, ressortir avec beaucoup de force cette idée que, même si l'univers était fini, rien ne permettrait de conclure que, une fois au repos, il s'y maintiendrait indéfiniment. On peut admettre que l'état où nous sommes a commencé à la fin d'une ancienne évolution et que la fin de l'ère actuelle marquera le début d'une ère nouvelle.

« Pareil à un mobile élastique qui, lancé dans l'air, atteint petit à petit le sommet de sa course, possède alors une vitesse nulle, est un instant en équilibre, puis retombe, pour rebondir de nouveau lorsqu'il aura touché le sol, le monde subirait des oscillations grandioses qui l'amèneraient d'abord à un maximum d'entropie jusqu'au moment où se

produirait une lente évolution en sens contraire qui le ramènerait vers l'état d'où il était parti et, ainsi de suite, dans l'infini des temps, sans arrêt véritable, se poursuivrait la *vie* de l'univers.

« Si l'on s'en tient à l'ère actuelle, l'évolution a un sens fixé, celui qui entraîne un accroissement d'entropie; on peut chercher, dans un système déterminé, à quelles manifestations physiques correspond cet accroissement.

« On constate que les formes écinétiques potentielles, électriques, chimiques de l'énergie, ont une grande tendance à se transformer en énergie calorifique. Une réaction chimique, par exemple, dégage de l'énergie, mais si la réaction ne se produit pas dans des conditions très spéciales, cette énergie passe immédiatement à la forme calorifique; la chose est si vraie que les chimistes parlent couramment de la chaleur dégagée par la réaction au lieu d'envisager l'énergie dégagée en général.

« Dans toutes ces transformations, l'énergie calorifique obtenue n'a pas la même valeur, au point de vue pratique, que celle d'où l'on est parti : on ne peut, en effet, d'après le principe de Carnot, la transformer intégralement en énergie mécanique, puisque la chaleur que possède un corps ne saurait donner du travail qu'à la condition qu'on en fasse descendre une partie sur un corps à température plus basse.

« Ainsi apparaît l'idée que les énergies, qui se changent et correspondent à des quantités égales, n'ont cependant pas la même valeur quantitative.

« Le principe de Carnot conduirait donc à envisager un certain classement des énergies et nous montrerait que, dans les transformations possibles, ces énergies tendent toujours vers une sorte de diminution de qualité, vers une *dégradation*.

« Il convient cependant de ne pas exagérer l'importance que l'on doit attribuer à ce mot d'énergie dégradée. Si la chaleur ne vaut pas le travail, si la chaleur à 99° ne vaut pas la chaleur à 100°, cela veut dire que nous ne pouvons pratiquement construire une machine transformant toute cette chaleur en travail, ou que pour une même source

froide, le rendement est supérieur lorsque la température de la source chaude est plus élevée; mais s'il était possible que cette source froide eût elle-même la température du zéro absolu, toute la chaleur réapparaîtrait sous la forme du travail. Le cas envisagé ici est un cas limite idéal : on ne saurait naturellement l'atteindre, mais cette considération suffit pour faire comprendre que le classement des énergies est un peu arbitraire, dépend des conditions au milieu desquelles les hommes vivent, plutôt peut-être qu'il ne dépend de la nature intime des choses. »

A propos de la loi de Clausius, Henri Poincaré (art. cité) fait remarquer que ce sens défini d'évolution d'un système tient à l'irréversibilité des phénomènes physiques, qui se manifeste surtout dans les phénomènes de frottement. Dans le frottement, en effet, un travail mécanique est transformé en chaleur, mais la transformation inverse ne saurait se produire et la chaleur dégagée fournir à nouveau la même quantité de travail. Il ajoute :

« Si nous observons alors qu'il n'y a pas en réalité de phénomène réversible, que la réversibilité n'est qu'un cas limite, un cas idéal dont la nature peut approcher plus ou moins, mais qu'elle ne peut jamais atteindre, nous serons amenés à conclure que l'instabilité est la loi de tous les phénomènes naturels.

« Les mouvements des corps célestes seraient-ils seuls à y échapper? On pourrait le croire en voyant qu'ils se passent dans le vide et sont ainsi soustraits au frottement.

« Mais le vide interplanétaire est-il absolu, ou bien les astres se meuvent-ils dans un milieu extrêmement ténu, dont la résistance est excessivement faible, mais qui est cependant résistant?

« Les astronomes n'ont pu expliquer le mouvement de la comète d'Encke (v. *fig.* 10) qu'en supposant l'existence d'un pareil milieu. Mais le milieu résistant qui rendrait compte des anomalies de cette comète, s'il existe, se trouve confiné dans le voisinage immédiat du Soleil. Cette comète y pénétrerait, mais, aux distances où sont les planètes, l'action de ce milieu cesserait de se faire sentir ou deviendrait beaucoup plus faible.

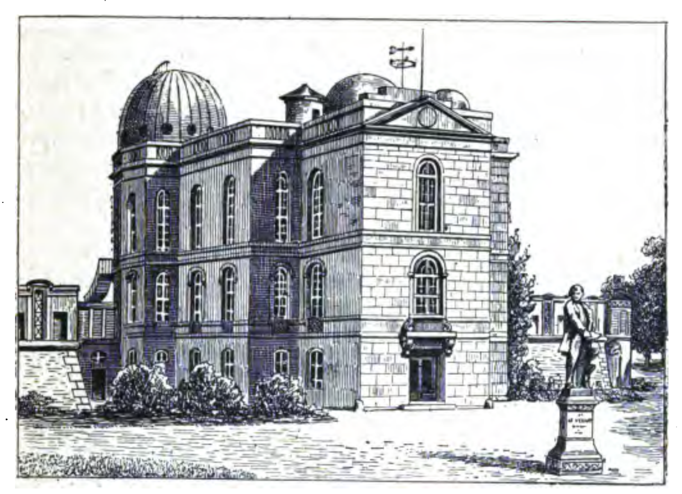


Fig. 11. — Observatoire de Paris.

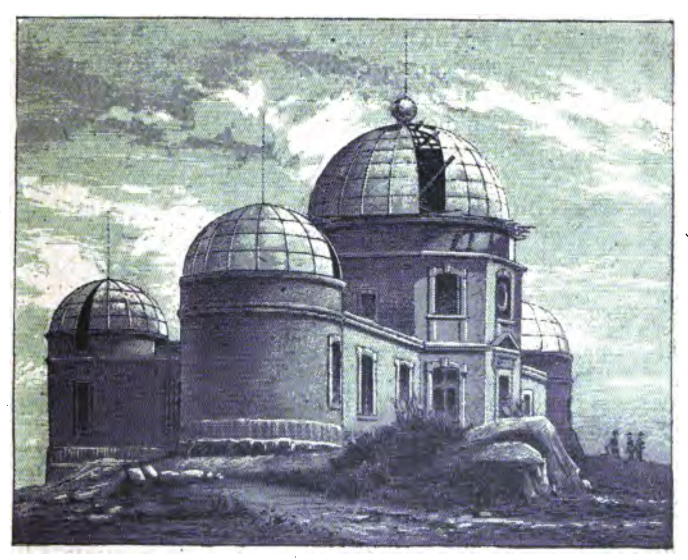


Fig. 12. — Observatoire de Madagascar.

« Il aurait pour effet indirect d'accélérer le mouvement des planètes; perdant de l'énergie, elles tendraient à *tomber* sur le Soleil, et, en vertu de la troisième loi de Képler, la durée de la révolution diminuerait en même temps que la distance au corps central. Mais il est impossible de se faire une idée de la rapidité avec laquelle cet effet se produirait, puisque nous n'avons aucune notion sur la densité de ce milieu hypothétique.

« Une autre cause dont je vais parler maintenant doit avoir, semble-t-il, une action plus prompte. Soupçonnée depuis longtemps, elle a été surtout mise en lumière par Delaunay et, après lui, par G. Darwin.

« Les marées, conséquences directes des mouvements célestes, ne s'arrêteraient que si ces mouvements cessaient eux-mêmes; cependant les oscillations des mers sont accompagnées de frottement et, par conséquent, produisent de la chaleur. Cette chaleur ne peut être empruntée qu'à l'énergie qui produit les marées, c'est-à-dire à la force vive des corps célestes.

« Nous pouvons donc prévoir que cette force vive se dissipe peu à peu par cette cause, et un peu de réflexion nous fera comprendre par quel mécanisme.

« La surface des mers soulevée par les marées présente une sorte de bourrelet. Si la pleine mer avait lieu au moment du passage de la Lune au méridien, cette surface serait celle d'un ellipsoïde dont l'axe irait passer par la Lune. Tout serait symétrique par rapport à cet axe, et l'attraction de la Lune sur ce bourrelet ne pourrait ni ralentir, ni accélérer la rotation terrestre.

« C'est ce qui arriverait s'il n'y avait pas de frottement; mais, par suite des frottements, la pleine mer est en retard sur le passage de la Lune; la symétrie cesse; l'attraction de la Lune sur le bourrelet ne passe plus par le centre de la Terre et tend à ralentir la rotation de notre globe.

« Delaunay estimait que, pour cette cause, la durée du jour sidéral augmente d'une seconde en cent mille ans. C'est ainsi qu'il voulait expliquer l'accélération séculaire du mouvement de la Lune. La lunaison nous semble deve-

nir plus courte, parce que l'unité de temps à laquelle nous la rapportons le jour deviendrait de plus en plus longue.

« Quoi qu'on doive penser du chiffre donné par Delaunay et de l'explication qu'il propose pour les anomalies du mouvement lunaire, il est difficile de contester l'effet produit par les marées.

« C'est même ce qui peut nous aider à comprendre un fait bien connu, mais bien surprenant. On sait que la durée de la rotation de la Lune est précisément égale à celle de sa révolution ; de telle sorte que s'il y avait des mers sur cet astre, ces mers n'auraient pas de marées dues à l'attraction de la Terre ; car pour un observateur situé en un point de la Lune, la Lune serait toujours à la même hauteur au-dessus de l'horizon.

. . . .

« Pourquoi la Lune n'éprouve-t-elle pas d'oscillations sensibles de part et d'autre de sa position d'équilibre (si nous éliminons, bien entendu, ses diverses librations dues à d'autres causes qui sont bien connues)? Ces oscillations devaient exister à l'origine ; il faut qu'elles se soient éteintes par une sorte de frottement ; et tout porte à croire que le mécanisme de ce frottement est celui que je viens d'analyser à propos des marées de nos océans.

« Quand la Lune n'était pas encore solidifiée et formait un sphéroïde fluide, ce sphéroïde a dû subir des marées énormes, à cause de la proximité de la Terre et de sa masse. Ces marées n'ont dû cesser que quand les oscillations ont été presque complètement éteintes.

. . . .

« J'ai expliqué plus haut l'action d'un milieu résistant ; j'ai montré comment, en faisant perdre de l'énergie aux planètes, elle accélère leur mouvement ; au contraire, l'action des marées, en faisant gagner de l'énergie à la Lune, ralentit son mouvement : le mois s'allonge donc en même temps que le jour.

« Quel est l'état final vers lequel tendrait le système, si cette cause agissait seule? Évidemment cette action ne s'arrêterait que quand les marées auraient cessé, c'est-à-dire

quand la rotation de la Terre aurait la même durée que la révolution lunaire.

« Ce n'est pas tout; dans l'état final, l'orbite de la Lune devrait être devenu circulaire. S'il en était autrement, les variations de la distance de la Lune à la Terre suffiraient pour produire des marées. Comme le mouvement de rotation n'aurait pas changé, il serait aisé de calculer quelle serait la vitesse angulaire commune de la Terre et de la Lune. On trouve que dans cet état limite, le mois comme le jour durerait environ 65 de nos jours actuels.

« Tel serait l'état final s'il n'y avait pas de milieu et si la Terre et la Lune existaient seules. Mais le Soleil produit aussi des marées; l'attraction des planètes en produit également sur le Soleil.

« Le système solaire tendrait donc vers un état limite où le Soleil, toutes les planètes et leurs satellites tourneraient, avec une même vitesse, autour d'un même axe, comme s'ils étaient des parties d'un même corps solide invariable. La vitesse angulaire finale différerait d'ailleurs peu de la vitesse de révolution de Jupiter.

« Ce serait là l'état final du système solaire, s'il n'y avait pas de milieu résistant; mais l'action du milieu, s'il existe, ne permettrait pas à cet état de subsister et finirait par précipiter toutes les planètes dans le Soleil.....

« ..... Ce n'est pas tout; la Terre est magnétique, et il en est probablement de même des autres planètes et du Soleil. On connaît l'expérience de Foucault : un disque de cuivre, tournant en présence d'un électro-aimant éprouve une grande résistance et s'échauffe dès que l'électro-aimant entre en action. Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique est parcouru par des courants d'induction qui l'échauffent; la chaleur engendrée ne peut être empruntée qu'à la force vive du conducteur. On peut donc prévoir que les actions électro-dynamiques de l'électro-aimant sur les courants d'induction doivent s'opposer au mouvement du conducteur. Ainsi s'exprime l'expérience de Foucault.

« Les astres doivent éprouver une résistance analogue, car ils sont magnétiques et conducteurs.

« Le même phénomène se produira donc, bien qu'extrêmement atténué par la distance ; mais les effets, se produisant toujours dans le même sens, finiront par s'accumuler ; ils s'ajoutent d'ailleurs à ceux des marées et tendent à amener le système au même état final.

« Ainsi, les corps célestes n'échappent pas à cette loi de Carnot, d'après laquelle le monde tend vers un état de repos final. Ils n'y échapperaient même pas s'ils étaient séparés par le vide absolu.

« Leur énergie se dissipe ; bien que cette dissipation n'ait lieu qu'avec une extrême lenteur, elle est assez rapide pour que l'on n'ait pas à se préoccuper des termes négligés dans les démonstrations actuelles de la stabilité du système solaire. »

Signalons, pour terminer, une très belle hypothèse d'Arrhénius, savant danois, destinée à montrer que la mort de l'Univers, par uniformisation progressive des températures, n'est pas du tout une conséquence nécessaire, et que le principe de Carnot, dont la valeur n'est pas contestée, se concilie avec une vie perpétuelle de l'Univers.

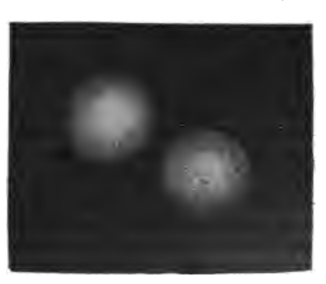


Fig. 13. — Système cosmogonique d'Arrhénius.

Soleil mort heurtant un autre soleil mort.

Arrhénius suppose le monde infini dans l'espace et dans le temps. L'Univers est comme une vaste machine thermique fonctionnant entre une source chaude, les étoiles, et une source froide, les nébuleuses. Il suppose que les nébuleuses, très peu denses, ne peuvent retenir, à cause de leur faible attraction, les molécules animées de grandes vitesses et dont l'ensemble constitue un corps chaud. Ces molécules retournent donc vers les étoiles, qui peuvent ainsi récupérer progressivement la chaleur perdue par le rayonnement. D'autre part, les nébuleuses peuvent rester froides, tout en recevant de la chaleur. On aura donc toujours, d'après cette hypothèse, les deux sources de températures différentes qu'exige le fonctionnement indéfini d'une machine thermique.

En outre, la cosmogonie d'Arrhénius, beaucoup plus vaste que celle de Laplace, contient un essai d'explication de l'*Évolution des mondes* en général. Elle s'appuie sur les récentes découvertes de la

physique : la spectroscopie, la radioactivité, les ondes électriques, les théories électroniques. Elle essaie même d'expliquer le transport de la vie d'un monde à l'autre.

Deux forces sont en présence dans cette évolution : la *gravitation universelle* et la *pression de radiation*, grâce à laquelle les astres perdent continuellement de la matière qui s'échappe dans les espaces interplanétaires. Cette matière, constituée principalement par des molécules gazeuses d'*hélium*, se rassemble en amas très peu denses et par conséquent très froids, et donne ainsi naissance à une nébuleuse. Celle-ci contient trois corps principaux : l'*hélium*, l'*hydrogène* et le *nébulium*, inconnu sur notre Terre; sous l'influence de poussières électrisées, elle peut devenir lumineuse. Puis ce nouveau monde évolue, il se concentre, sa rotation augmente et sa température s'élève à mesure que la concentration devient plus nette. Les planètes se forment à peu près suivant l'hypothèse de Laplace. Ce monde, une fois mort par le refroidissement, va pouvoir donner naissance à d'autres mondes, soit en devenant un centre de condensation pour une nébuleuse qu'il rencontre, soit en rencontrant un autre astre (*fig.* 13). Dans ce dernier cas, la chaleur dégagée par le choc est telle que tout est volatilisé instantanément : les *Novæ*, ou étoiles nouvelles, sont dues sans doute à un cataclysme de ce genre (*fig.* 14). Tel est le cycle éternel par lequel l'Univers se reproduit sans cesse.

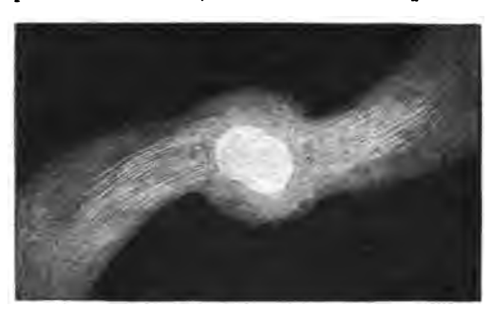


Fig. 14. — Hypothèse cosmogonique d'Arrhénius.
Monde nouveau résultant du choc de deux astres (nébuleuse spirale).

Le germes vivants eux-mèmes, qui sont capables de résister à de très basses températures, peuvent, grâce à leur petitesse qui rend prépondérante sur eux la pression de radiation, sortir de notre atmosphère et aller semer la vie sur d'autres planètes où les conditions de la vie organique se trouvent réalisées.





TROISIÈME PARTIE

ASTRONOMIE PHYSIQUE

Les progrès les plus saillants que l'Astronomie a réalisés au cours du XIXe siècle constituent une branche nouvelle de cette science, à peu près uniquement descriptive et presque inconnue encore au siècle précédent, et que l'on nomme l'*Astronomie physique*. Elle a pour but de nous renseigner sur la constitution des diverses planètes et même des étoiles; ses progrès sont dus surtout aux perfectionnements successifs des instruments réalisés à la fin du XVIIIe siècle par le grand astronome William Herschel (1738-1822).

VII. — INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES

Au temps de Galilée, de Gassendi et de Huyghens, l'achromatisme des lentilles était inconnu. Les images observées dans les lunettes présentaient des contours indécis et colorés comme un arc-en-ciel. De plus, les étoiles apparaissaient comme auréolées de rayons dans tous les sens et les meilleurs instruments les montraient encore sous forme d'objets triangulaires, ce qui leur avait fait donner le nom de *tricornes*. Les instruments que construisit Herschel fournirent des images d'une parfaite netteté, sans aucune irisation, grossies 2 000 fois environ ; jamais on n'était parvenu à un tel pouvoir amplificateur. Ses télescopes avaient jusqu'à 9 mètres de distance focale.

Depuis lors la construction d'instruments de ce genre n'a fait que progresser. Il faut joindre, aux services rendus par les lunettes et les télescopes, ceux que nous a fournis le spectroscope sur la constitution chimique des étoiles. Enfin la photographie céleste a rendu possible un recensement du ciel, plus précis et plus complet qu'aucune observation ne l'avait permis jusqu'alors. Nous allons donner une idée de ces instruments et de ces procédés.

Lunette méridienne. — Toute lunette se compose d'un objectif et d'un oculaire. L'objectif est destiné à fournir une image réelle de l'astre observé ; l'oculaire, qui peut être constitué par une seule lentille ou par un microscope, grossit cette image et permet de l'examiner.

Un instrument méridien est constitué par une lunette astronomique mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien du lieu où l'on observe. L'axe optique de la lunette, qui est aussi rigoureusement que possible normal à l'axe de rotation, décrit donc le méridien du lieu ; la lunette entraîne dans son mouvement un limbe gradué dont les divisions passent sous des microscopes fixes servant de points de repère. Ces microscopes permettent de lire avec une grande précision la valeur des angles observés. On peut avec cet instrument noter le passage d'une étoile au méridien, et déterminer ainsi l'heure de ce passage et sa distance zénithale.

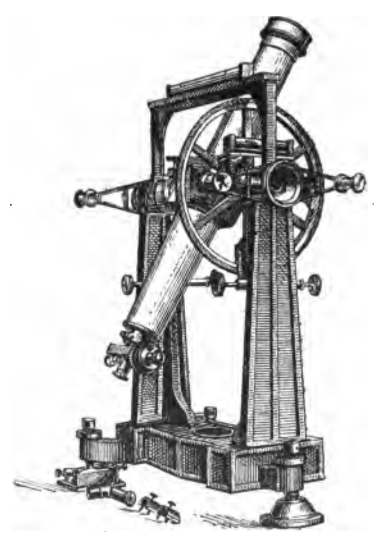


Fig. 15. — Lunette astronomique.

Tous les observatoires possèdent aujourd'hui des instruments de ce genre (*fig.* 15).

Équatorial. — C'est une lunette destinée à suivre un astre dans son mouvement diurne et à l'observer aussi longtemps que l'on veut. En effet, le champ d'une lunette astronomique, dont le grossissement est considérable, est toujours assez restreint ; un astre n'y demeure pas longtemps par suite de son mouvement sur la sphère céleste, et une observation un peu prolongée nécessiterait un déplacement continuel de la lunette, très incommode si l'opérateur était obligé de l'accomplir lui-même. Ce déplacement se fait donc au moyen d'un mouvement d'horlogerie. Voici comment est constitué l'appareil :

La lunette, équilibrée par un contrepoids n, est entraînée par un axe dirigé suivant la ligne des pôles et auquel un mouvement d'horlogerie imprime une rotation uniforme, dans le sens du mouvement diurne, avec la vitesse même de ce mouvement. On peut d'ailleurs caler la lunette dans toutes les directions et amener dans le champ un astre quelconque (*fig.* 16 et 17).



CŒLOSTAT AVEC CHAMBRE PHOTOGRAPHIQUE ÉQUATORIALE

L'observatoire de Meudon possède un équatorial dont l'objectif a 82 centimètres de diamètre ; la longueur du tube est de 17 mètres et sa coupole, qui pèse 70 000 kilogrammes, est actionnée par un moteur à gaz de 12 chevaux.

Équatorial coudé. — M. Lœvy a imaginé un dispositif d'équatorial coudé qui rend les observations beaucoup plus commodes,

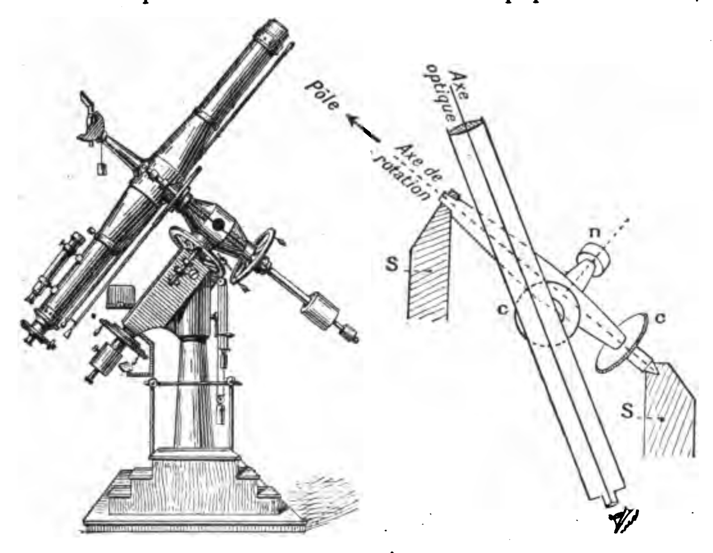


Fig. 16 et 17. — Équatorial.

SS, piliers soutenant l'axe de rotation dirigé suivant la ligne des pôles. CC, cercles gradués servant aux observations.

puisque l'oculaire ne se déplace pas et qu'ainsi l'observateur peut examiner les astres dans une salle close (*fig.* 18). L'axe SS' qui porte l'oculaire est dirigé suivant la ligne des pôles et tourne sur lui-même avec la vitesse du mouvement diurne. L'objectif D est monté à l'extrémité d'un tube coudé à angle droit sur celui-ci. Un miroir plan *m'*, placé à 45° dans le coude, renvoie sur l'oculaire les rayons venus de l'objectif. Enfin devant ce dernier se trouve disposé un second miroir *m*, qui peut tourner autour de l'axe du tube. Grâce à ces deux mouvements, on peut amener et conserver dans le champ tel astre que l'on veut.

Lunette de l'Exposition de 1900. — On avait construit, pour l'Exposition de 1900, une lunette gigantesque dont l'objectif mesurait 1m,25 de diamètre et plus de 60 mètres de distance focale. Il ne

pouvait être question, à cause des flexions qui n'auraient pas manqué de se produire, de monter une pareille lunette comme un équatorial ordinaire; aussi était-elle fixe et installée horizontalement sur des piliers en maçonnerie; un sidérostat, constitué par un grand miroir plan mû par un mouvement d'horlogerie, était placé devant l'objectif et dirigeait sur celui-ci la lumière de l'astre observé.

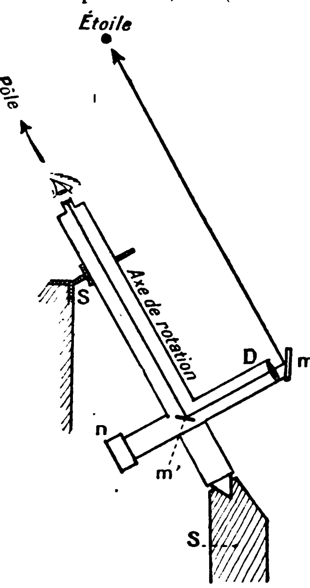


Fig. 18. — Équatorial coudé. Coupe schématique.

Télescopes. — Les instruments que nous venons de décrire sont fondés sur les lois de la réfraction, c'est-à-dire que l'on y utilise principalement des lentilles à travers lesquelles passent les rayons lumineux. Les télescopes, dont nous allons maintenant dire quelques mots, sont composés presque uniquement de miroirs et les lois de la réflexion en fournissent les principes essentiels.

On sait que Newton est l'inventeur du télescope (*fig.* 19). Cet instrument se compose essentiellement d'un miroir sphérique concave placé au fond d'un tube cylindrique et d'un oculaire *o* constitué par une lentille et destiné à examiner l'image *ab* fournie par le miroir. Cette image est renvoyée sur le côté de l'instrument, en *a'b'*, au moyen d'un miroir plan *m*, comme l'indique la figure 19.

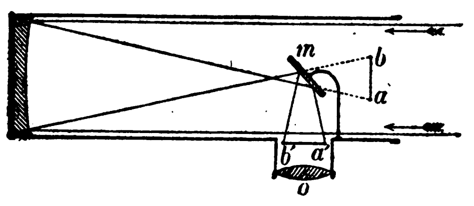


Fig. 19. — Télescope . coupe schématique.

Télescope de Foucault. — Foucault a apporté au télescope de Newton des modifications importantes qui en font, en quelque sorte, un instrument nouveau. Le miroir n'est plus en métal poli, qui s'altère assez rapidement au contact de l'air; il est en verre

argenté sur sa surface réfléchissante ; lorsque celle-ci est ternie, on lui rend son pouvoir réflecteur par une nouvelle réargenture. En outre, le miroir, au lieu d'être sphérique, est taillé suivant un paraboloïde de révolution (1). Les lois de l'optique permettent en effet de démontrer que, dans ces conditions, les images des objets très éloignés sont extrêmement nettes et peuvent alors supporter un grossissement beaucoup plus grand que celui qu'on obtient avec une simple loupe. L'oculaire, dans le télescope de Foucault (*fig.* 20), est alors constitué par un microscope.

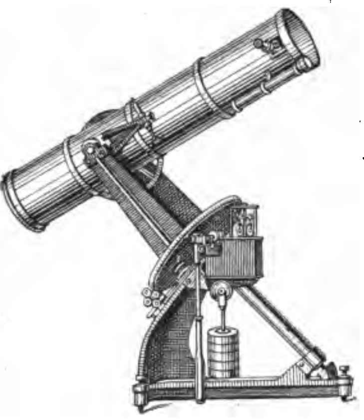


Fig. 20. — Télescope de Foucault.

Ajoutons que le polissage d'un miroir de télescope est un travail de haute précision qui demande plusieurs mois. En France, les frères Henry, de l'Observatoire de Paris, ont produit en ce genre des spécimens remarquables.

Spectroscope. — On sait que la lumière blanche passant à travers un prisme se trouve décomposée en un certain nombre de couleurs simples, c'est-à-dire elles-mêmes indécomposables par le prisme et qui sont le violet, l'indigo, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé, le rouge : c'est cet

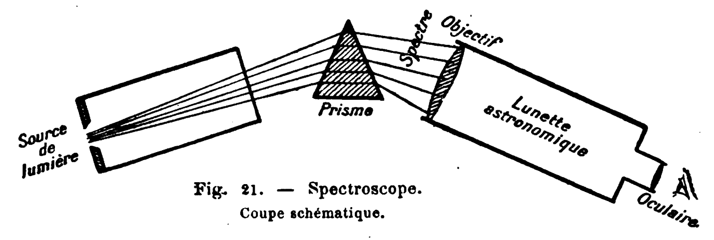


Fig. 21. — Spectroscope.
Coupe schématique.

ensemble de couleurs qu'on nomme le spectre de la lumière blanche. Toute lumière, pourvu qu'elle ne se ramène pas à une couleur simple, a un spectre déterminé, parfois discontinu, c'est-à-dire laissant des intervalles sombres entre les bandes lumineuses qui le

(1) Surface engendrée par la rotation d'une parabole autour de son axe de symétrie.

composent et qui sert à le caractériser. Nous verrons plus loin le parti que l'on a tiré de ces faits pour l'étude de la constitution chimique des astres. Voyons d'abord comment est composé l'instrument qui permet une étude précise de ces spectres et qui a reçu pour cette raison le nom de spectroscope (*fig.* 21 et 22).

Nous y trouvons essentiellement un prisme sur lequel on dirige un rayon lumineux reçu à travers une fente fine. Ce rayon lumineux, après dispersion, est reçu par l'objectif d'une lunette astronomique analogue à celle que nous avons décrite plus haut, et qui permet d'examiner le spectre à un fort grossissement.

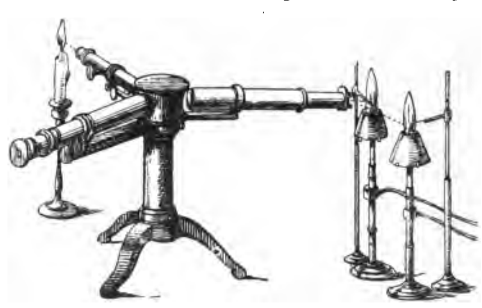


Fig. 22. — Spectroscope. Vue extérieure.

Pour comprendre en quoi consiste l'analyse spectrale, il nous faut rappeler quelques principes simples.

Les corps solides ou liquides incandescents donnent un spectre continu, d'autant plus étendu du côté du violet que leur température est plus élevée. C'est ce que l'on observe en éclairant le spectroscope avec une lampe électrique dont on chauffe le filament de charbon à l'aide d'un courant progressivement croissant. Au rouge sombre, c'est-à-dire vers 600°, le spectre se trouve réduit aux rayons rouges, mais à mesure que la température s'élève, d'autres rayons de plus en plus réfrangibles viennent s'y ajouter et le violet apparaît vers 800°. La flamme d'un bec de gaz donne de même un spectre continu, parce qu'elle doit son éclat à des particules solides de carbone incandescent.

Le spectre d'un corps gazeux porté à une haute température est un spectre discontinu formé d'un ensemble de raies brillantes. Ainsi la vapeur de sodium incandescente donne une raie jaune, celle du strontium une raie violette. Le spectre de l'hydrogène contient trois raies principales, rouge, verte, indigo.

Le spectroscope permet alors de reconnaître très facilement la présence d'un corps et, par exemple, d'un métal dans une substance donnée ; il suffit pour cela de volatiliser celle-ci et de chercher si dans le spectre obtenu on trouve les raies du métal cherché. Cette méthode est extrêmement sensible, puisqu'elle permet de déceler dans la flamme d'un bec Bunsen la présence de 1/3 000 000 de milligramme de sodium.



LA GRANDE LUNETTE DE L OBSERVATOIRE DE PARIS

Nous avons dit qu'un corps solide ou liquide donnait un spectre continu. Mais si l'on interpose entre une source lumineuse de ce genre et le spectroscope une matière gazeuse portée elle-même à l'incandescence, à la place des raies brillantes que donnerait le gaz s'il était seul, on voit dans le spectroscope apparaître des raies noires. Par exemple, si le gaz en question est du sodium, la bande jaune du spectre, au lieu d'être continue, présenterá deux raies obscures correspondant précisément aux deux raies jaunes que donnerait le sodium s'il était seul. Ce phénomène, connu sous le nom de « renversement des raies », a été découvert par Foucault (*fig.* 23); il est de la plus haute importance. On peut dire que l'analyse chimique des astres lui doit sa possibilité. C'est grâce à lui que l'on peut connaître en particulier, comme nous le verrons plus loin, la constitution chimique du Soleil.

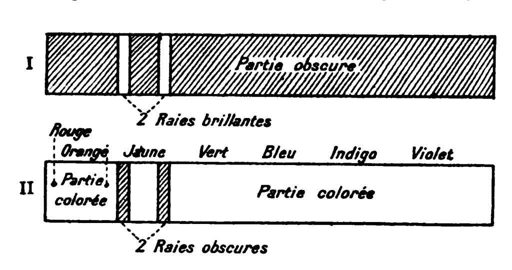


Fig. 23. — Renversement des raies.

I. Spectre de la vapeur de sodium. — II. Spectre d'un solide incandescent devant lequel on a placé une flamme de sodium : deux raies noires correspondant aux raies brillantes de I et se manifestant dans la partie jaune du spectre.

Photographie astrale. — Enfin il convient, dans l'étude de l'Astronomie physique, de faire une place toute spéciale à la photographie. Ses avantages sont de plusieurs sortes. D'abord aucune observation ne peut lutter avec elle pour la précision. La plaque sur laquelle se gravent les traces lumineuses des étoiles ou des planètes peut être quadrillée; la détermination de l'ascension droite et de la déclinaison d'une étoile par rapport à d'autres étoiles connues (c'est-à-dire sa longitude et sa latitude) devient alors des plus faciles.

La photographie permet encore de découvrir des étoiles que l'œil, même armé des plus puissants instruments, ne saurait apercevoir à cause de leur faible luminosité. En effet, en laissant un temps suffisamment long la plaque photographique sur laquelle se fait l'inscription, la lumière envoyée par l'astre d'un faible éclat s'ajoute à elle-même et finit ainsi par donner une trace visible.

Enfin on doit à la photographie la découverte de corps, situés dans le système solaire, que leur petitesse et leur faible éclat ne

permettaient pas de spécifier : ces corps font partie de ce qu'on nomme « les petites planètes ».

L'appareil qui sert à photographier une région du ciel est en général monté sur un instrument équatorial, c'est-à-dire qu'il suit les étoiles dans leur mouvement. Une étoile s'y inscrit donc nécessairement comme un point; mais supposons qu'une planète se trouve dans le champ de l'appareil; au bout d'un certain temps, elle se sera déplacée par rapport aux étoiles qui l'avoisinent sur la sphère céleste et se sera inscrite, par conséquent, non comme un point, mais comme un petit trait continu.

Rappelons enfin l'entreprise internationale de la carte photographique du ciel, suscitée par l'amiral Mouchez ; on peut, dès maintenant, se faire une haute idée des progrès que cette carte fera réaliser à l'Astronomie.



VIII. — LE SOLEIL

Constitution générale. La Photosphère. — Le disque du Soleil, observé à un fort grossissement, ne présente pas un éclat uniforme. On y distingue çà et là (*fig.* 24) des plages plus brillantes que le reste, nommées *facules,* et des taches plus ou moins étendues, formées d'un noyau sombre et d'une pénombre. On admet, d'après de nombreuses observations, que ces taches ont la forme d'entonnoirs, laissant à découvert la structure profonde du Soleil, qui offre ainsi à l'extérieur une couche assez mince très lumineuse appelée, pour cette raison, la *photosphère,* et à l'intérieur une masse plus sombre.

Le Soleil a été, au XIXe siècle, étudié surtout par le P. Secchi (1), et, plus récemment, par Janssen (2).

« Les grandes images solaires qui ont été obtenues dans ces dernières années, à l'observatoire de Meudon, dit Janssen, ont révélé des phénomènes de la surface du Soleil que ne peuvent montrer nos plus grands instruments d'observation et qui ouvrent un champ nouveau à ces études. Par leur aide nous connaissons enfin la véritable forme de ces éléments de la photosphère sur lesquels il avait été émis tant d'assertions différentes et contradictoires. Ces éléments sont constitués par une matière fluide qui obéit avec facilité à l'action des forces extérieures. Dans les points de calme

(1) Directeur de l'observatoire du Collège Romain, auteur d'un ouvrage sur le Soleil (Paris, Gauthier-Villars, 1870).

(2) Janssen (Pierre), né à Paris en 1824, mort en 1907. — De 1865 à 1871, il professa un cours de physique générale à l'École spéciale d'architecture. Il fut chargé de nombreuses missions scientifiques au Pérou, en Italie, pour étudier les raies telluriques du spectre solaire, etc. En 1868, par l'observation d'une éclipse de Soleil, il découvrit la nature des protubérances. En 1871, il constata l'existence d'une nouvelle et dernière enveloppe gazeuse du Soleil, qu'il nomma atmosphère coronale. Il fonda, à Meudon, un observatoire d'Astronomie physique. Il fut élu membre de l'Académie des sciences en 1873. Ses travaux se rapportent surtout à l'analyse spectrale et à l'étude physique des astres. On lui doit un instrument, le compas aéronautique, qui permet de fixer à chaque instant, sur la carte, la position d'un aérostat.

relatif, la matière photosphérique prend des formes qui se rapprochent plus ou moins de la sphère, et l'aspect est celui d'une granulation générale. Au contraire, partout où règnent des courants et des mouvements de matière plus violents, les éléments granulaires sont plus ou moins étirés et prennent des aspects qui rappellent des formes de grains de riz, de feuilles de saule ou même de véritables filaments.

« Mais ces régions, où la photosphère est plus agitée, forment des plages limitées. Dans les intervalles, c'est la forme

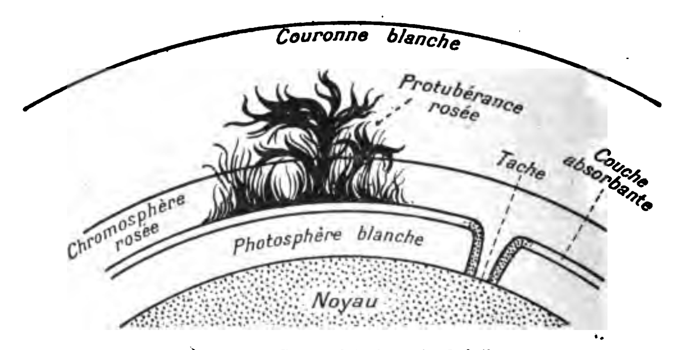


Fig. 24. — Coupe théorique du Soleil.

granulaire qui s'observe (*fig.* 26). Il résulte de cette constitution particulière que la surface du Soleil offre l'aspect d'un réseau dont les mailles seraient formées par des chapelets de grains plus ou moins réguliers, montrant dans les intervalles des corps étirés, allongés dans toutes les directions (*fig.* 27). »

Chromosphère et Protubérances. — Les éclipses nous offrent un remarquable moyen d'observation. Elles ont permis de reconnaître que la surface du Soleil, loin d'être rigoureusement sphérique, est hérissée de dentelures ou protubérances (*fig.* 24 et 25). Aussitôt, en effet, que le disque du Soleil est entièrement recouvert par celui de la Lune, on voit apparaître « ces protubérances d'un rose corail qui se détachent sur le fond d'une auréole doucement lumineuse, de couleur blanche mate et comme veloutée ». Ces flammes s'élèvent parfois à des hauteurs égales à 10 fois le diamètre de la Terre. Ces protubérances font partie d'une couche rose



J. JANSSEN (1824-1907)
Astronome français. Né et mort à Paris.

Phot. Nadar.

qui entoure le Soleil, et qu'on nomme à cause de sa teinte la *chromosphère* (*fig.* 24) : sorte d'atmosphère peu élevée sur la plus grande partie de la surface solaire, sauf aux points où elle s'est soulevée pour former les flammes qui constituent la protubérance.

« Au Soleil d'Herschel et d'Arago, formé d'un noyau central et d'une enveloppe lumineuse nommée la photosphère, vient s'ajouter une couche formée principalement d'hydrogène incandescent. Cette couche, en contact immédiat avec la photosphère, est très mince; elle a seulement 8 à 12" d'épaisseur (1); elle est le siège de petites éruptions de vapeurs métalliques provenant de la photosphère et où dominent le sodium, le magnésium et le calcium. Mais fréquemment, surtout à l'époque où les taches solaires deviennent abondantes, s'élèvent du globe solaire de formidables éruptions d'hydrogène, qui traversent cette même enveloppe, la chromosphère, et s'élèvent jusqu'à vingt et trente mille lieues de hauteur. Ces éruptions, ce sont les protubérances des éclipses totales, dont la nature est ainsi révélée et les formes parfaitement expliquées. »

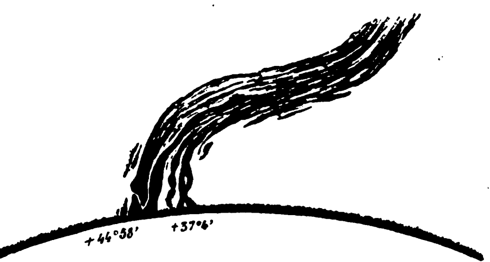


Fig. 25. — Protubérance solaire en forme de flamme, observée le 15 août 1890.

Ces indications si précises sont dues à l'emploi du spectroscope. En effet le spectre fourni par la lumière solaire n'est pas continu : il contient un très grand nombre de raies noires. Ces raies ont été soigneusement étudiées et classées; on en compte aujourd'hui 20 000, fixées toutes, à un dix-millionième de millimètre près, au moyen des spectroscopes à très grande dispersion. Ces raies ne sont autres que celles du spectre renversé d'un certain nombre de métaux connus, et on admet alors l'hypothèse suivante :

La photosphère, formée de matières liquides incandescentes, don-

(1) On sait que le diamètre apparent du Soleil mesure 1 920".

nerait, si elle était seule, un spectre continu ; mais la chromosphère, formée de vapeurs incandescentes, absorbe certains rayons, exactement comme dans l'expérience de Foucault que nous avons citée plus haut, et des raies noires apparaissent alors dans le spectre à la place même des raies brillantes qu'offrirait le spectre de la chromosphère seule. On peut donc connaître par ce moyen la constitution de l'atmosphère solaire. Il s'y trouve de l'hydrogène, du sodium, du magnésium, du carbone et beaucoup d'autres métaux.

Fig. 26. — Photographie du Soleil montrant l'aspect granulaire du disque.

D'autre part, certains corps paraissent manquer dans le Soleil : l'oxygène, le silicium, l'argent, le mercure, l'or, le platine. Janssen a réussi à observer, au moyen du spectroscope, les protubérances, même en dehors du phénomène des éclipses. Pour cela il dirigeait la fente du spectroscope sur le bord du Soleil et son instrument ne recevait ainsi que la lumière fournie par la chromosphère. Voici comment il expose les principes de sa méthode :

« Le jour de l'éclipse, le Soleil brilla dès son lever, bien qu'il fût encore dans une couche de vapeurs ; il s'en dégagea bientôt ; au moment où nos lunettes nous signalaient le commencement de l'éclipse, il brillait de tout son éclat.

« Bientôt le disque solaire se trouve réduit à une mince faucille lumineuse. On redouble d'attention. Les fentes spectrales sont tenues en contact avec la portion du limbe lunaire qui va éteindre les derniers rayons solaires, de

manière que ces fentes seront amenées par la Lune elle-même dans les plus basses régions de l'atmosphère solaire, quand les deux disques seront tangents.

« L'obscurité a lieu tout à coup et les phénomènes spectraux changent subitement d'une manière bien remarquable.

« Deux spectres formés de cinq ou six lignes très brillantes, rouge, jaune, verte, bleue, violette, occupent le champ spectral et remplacent l'image prismatique solaire qui vient de disparaître. Ces spectres, hauts d'environ une minute, se correspondent raie pour raie : ils sont séparés par un espace obscur, où on ne distingue aucune raie brillante. Le chercheur montre que ces deux spectres sont dus à deux magnifiques protubérances, qui brillent maintenant à droite et à gauche de la ligne des contacts où vient d'avoir lieu l'extinction. L'une d'elles surtout, celle de gauche, est d'une hauteur de plus de trois minutes; elle rappelle la flamme d'un feu de forge, sortant avec force des ouvertures du combustible, poussée par la violence du vent. La protubérance de droite présente l'aspect d'un massif de montagnes neigeuses, dont la base reposerait sur le limbe de la Lune, et qui seraient éclairées par un soleil couchant.

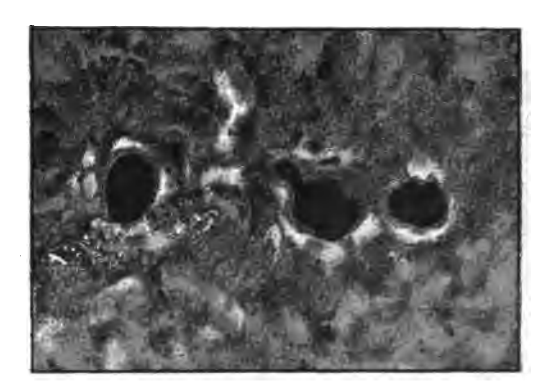


Fig. 27. — Taches solaires.

« Témoin de l'éclat des lignes des protubérances et comme inspiré par la beauté du phénomène que j'avais devant les yeux, je dis aux observateurs qui m'entouraient : « Je ver-« rai ces lignes-là en dehors des éclipses. » Si le temps l'eût

permis, j'aurais tenté immédiatement de les suivre après la réapparition du Soleil; mais le ciel se couvrit après l'éclipse. Pendant la nuit du 18 au 19 août, la méthode pour retrouver ces lignes et en déduire la forme et la situation des protubérances se formule nettement à mon esprit. Levés à 3 heures du matin, M. Redier et moi, nous fîmes rapidement les quelques préparatifs indispensables, et, vers 10 heures, je retrouvais, dans les régions protubérantielles de la veille, les lignes de leur spectre. M. Redier les vit et fut initié à la méthode et aux conséquences que je comptais en tirer.



Fig. 28. — Grande protubérance solaire. (Hauteur = 36 diamètres terrestres).

« Considérée dans son principe, la nouvelle méthode repose sur la différence des propriétés spectrales de la lumière des protubérances et de la photosphère. La lumière photosphérique, émanée de particules solides ou liquides incandescentes, est incomparablement plus puissante que celle des protubérances due à un rayonnement gazeux. Aussi a-t-il été jusqu'ici à peu près impossible d'apercevoir les protubérances en dehors des éclipses; mais on peut renverser les termes de la question en s'adressant à l'analyse spectrale. En effet, la lumière solaire se distribue par l'analyse, dans toute l'étendue du spectre, et par là s'affaiblit beaucoup; les protubérances, au contraire, ne fournissent qu'un petit nombre de faisceaux, dont l'intensité reste très comparable aux rayons solaires correspondants. C'est ainsi que les raies protubérantielles sont perçues très facilement dans le champ spectral, sous le spectre solaire, tandis que les images directes des protubérances sont comme écrasées par la lumière éblouissante

de la photosphère. Une circonstance fort heureuse pour la nouvelle méthode vient s'ajouter à ces données favorables. En effet, les raies lumineuses des protubérances correspondent à des raies obscures du spectre solaire. Il en résulte que, non seulement on les aperçoit plus facilement dans le champ spectral sur les bords du spectre solaire, mais qu'il est même possible de les voir dans l'intérieur de ce spectre,

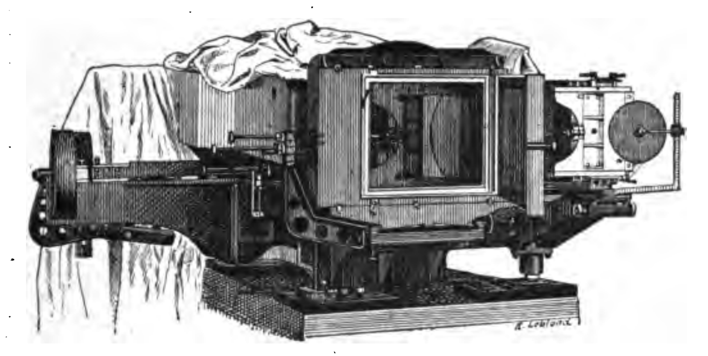


Fig. 29. — Spectrohéliographe de Hale.

et par conséquent de suivre la trace des protubérances sur le globe solaire même.

« Le lendemain 19, levé à 3 heures du matin, je fis tout disposer pour de nouvelles observations.

« Le Soleil se leva très beau. Aussitôt qu'il fut dégagé des plus basses vapeurs de l'horizon, je commençai à l'explorer. Voici comment je procédai : par le moyen du chercheur de ma grande lunette, je plaçai la fente du spectroscope sur le bord du disque solaire, dans la région même où, la veille, j'avais observé les protubérances lumineuses. Cette fente. placée en partie sur le disque solaire et en partie en dehors, donnait par conséquent deux spectres, celui du Soleil et celui de la région protubérantielle. L'éclat du spectre solaire était une grande difficulté ; je la tournai en masquant dans le spectre solaire le jaune, le vert et le bleu, les portions les plus brillantes. Toute mon attention était dirigée sur la

ligne C, obscure pour le Soleil, brillante pour la protubérance, et qui, répondant à une partie moins lumineuse du spectre, devait être beaucoup plus facilement perceptible.

« J'étais depuis peu de temps occupé à étudier la région protubérantielle du bord occidental, quand j'aperçus tout à coup une petite raie rouge, brillante, de 1 à 2 minutes, formant le prolongement rigoureux de la raie obscure C du spectre solaire. En faisant mouvoir la fente du spectroscope de manière à balayer méthodiquement la région que j'explorais, cette ligne persistait, mais elle se modifiait dans sa longueur et dans l'éclat de ses diverses parties, accusant ainsi une grande variabilité dans la hauteur et dans le pouvoir lumineux des diverses régions de la protubérance.

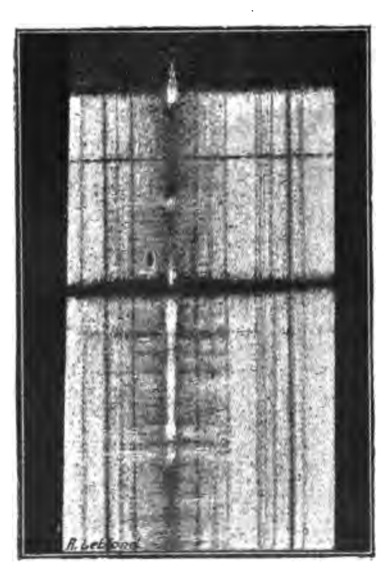


Fig. 30. — Spectrohéliographe montrant la ligne K sur le disque et le bord solaire.

« Cette exploration fut faite à trois reprises différentes, et toujours la ligne brillante apparut dans les mêmes circonstances. Peu après je constatai que la raie brillante F se montrait en même temps que C.

« Dans l'après-midi je revins encore à la région étudiée le matin; les lignes brillantes s'y montrèrent de nouveau, mais elles accusaient de grands changements dans la distribution de la matière protubérantielle; les lignes se fractionnaient quelquefois en tronçons isolés qui ne se réunissaient pas à la ligne principale, malgré les déplacements de la fente d'exploration. Ce fait indiquait l'existence de nuages isolés, qui s'étaient formés depuis le matin. Dans la

région de la grande protubérance, je trouvai quelques lignes brillantes, mais leur longueur et leur distribution accusaient, là aussi, de grands changements.

« Ainsi se trouvait démontrée la possibilité d'observer les raies des protubérances en dehors des éclipses, et d'y trouver une méthode pour l'étude de ces corps.

« Ces premières observations montraient déjà que les coïncidences des raies C et F étaient bien réelles et, dès lors, que l'hydrogène formait en effet la base de ces matières circumsolaires. Elles établissaient, en outre, la rapidité des changements que ces corps éprouvent, changements qui ne pouvaient être pressentis pendant les si courtes observations des éclipses.

« En suivant avec beaucoup d'attention les lignes protubérantielles, j'ai quelquefois observé qu'elles pénètrent dans les lignes obscures du spectre solaire, accusant ainsi un prolongement de la protubérance sur le globe solaire lui-même. Ce résultat était facile à prévoir, mais l'interposition de la Lune eût toujours rendu la constatation impossible pendant les éclipses. »

La Couronne. — Enfin on aperçoit des jets de lumière s'étendant beaucoup plus loin que la chromosphère, assez semblables aux pétales d'une fleur, et que l'on nomme la *couronne* ou *atmosphère coronale.* Son éclat est plus faible que celui de la chromosphère; aussi n'a-t-on pas pu encore l'observer en dehors des éclipses. Son existence ne peut s'expliquer par un simple rayonnement du Soleil, comme le montre l'étude de son spectre; on y découvre en outre une raie spéciale, indiquant l'existence dans la couronne d'une substance nouvelle nommée *hélium,* qui suffit à la caractériser.

Voici, d'après Janssen, les résultats de quelques remarquables observations de la couronne solaire :

« On sait que le phénomène des éclipses totales emprunte principalement sa splendeur, non aux protubérances, mais à la magnifique auréole qui entoure l'astre éclipsé. Cette auréole ou couronne, avec ses rayons en gloire, ses gerbes et tous ses appendices lumineux, paraît quelquefois occuper dans le ciel un espace trois à quatre fois plus grand que celui du Soleil lui-même.

« Mais ce phénomène est aussi énigmatique que ravissant. Chaque fois qu'une éclipse totale a permis de l'étudier, il s'est présenté avec des apparences si irrégulières, si bizarres, si changeantes, qu'il a été impossible, avec les ressources ordinaires de l'optique, d'en découvrir la cause. C'est l'analyse spectrale, combinée avec la méthode polariscopique, qui nous a permis de pénétrer, en grande partie du moins, l'énigme de la couronne solaire.

« La couronne fut particulièrement étudiée, avec le spectroscope, en 1869 et dans les éclipses suivantes.

« En 1869, l'éclipse avait lieu dans l'Amérique du Nord. Les savants américains recueillirent alors des faits très importants, parmi lesquels il faut citer plusieurs photographies de la couronne qui montraient le pouvoir actinochimique du phénomène et la constatation de cette raie verte qui paraît caractériser le spectre coronal. »

Observation de 1870. — « L'année suivante, le 22 décembre 1870, une nouvelle éclipse avait lieu dans le bassin méditerranéen. Cette fois, la plupart des nations savantes prirent part aux observations. De nombreuses commissions vinrent s'échelonner sur l'étroit parcours du phénomène, en Sicile, en Afrique et en Espagne.

« Quant à la France, elle était alors envahie et Paris assiégé. Plusieurs de mes amis d'outre-Manche, désireux de me voir prendre part aux observations, avaient eu la généreuse pensée de demander à M. de Bismarck ma libre sortie de Paris, et leur demande allait être accordée, mais je m'étais mis en mesure de me passer de la générosité de nos ennemis. Avec le concours du Gouvernement, et sous les auspices de l'Académie des sciences, j'avais préparé une sortie de Paris par la voie aérienne. Un ballon (le *Volta*), semblable à ceux que le Gouvernement faisait construire pour le service des dépêches, fut mis à ma disposition. J'emportai un télescope d'un modèle nouveau, qui devait donner de l'auréole un spectre quinze ou seize fois plus lumineux qu'une lunette astronomique ordinaire et permettait en conséquence de lever les principales difficultés qui avaient été rencontrées dans l'analyse du mystérieux



OBSERVATION DES TACHES SOLAIRES
AVEC LA LUNETTE ASTRONOMIQUE DU PARC SAINT-MAUR, PRÈS PARIS.

phénomène. Ce télescope, dont le miroir avait 0m,40 de diamètre, était plutôt un instrument d'observation que de voyage et la voie que j'allais suivre ne semblait guère en permettre le transport; mais je m'assurai que ces difficultés n'étaient pas insurmontables. Le corps de l'instrument pouvait être remplacé, pour une courte observation, par un corps provisoire construit en Algérie où j'allais observer. J'emportai donc seulement le miroir monté et tous les organes. Ces diverses pièces furent emballées et réparties dans quatre caisses pleines de rognures de papier qui servirent à les coussiner de telle sorte que les chocs les plus violents n'auraient pu les endommager. Les caisses, cerclées de fer et rembourrées extérieurement, furent distribuées autour de la nacelle de l'aérostat.

« Je partis le 2 décembre, à 6 heures du matin, le jour même de la bataille de Champigny. J'étais accompagné d'un marin pour m'aider dans les manœuvres, mais je conduisais moi-même. Nous traversâmes les lignes ennemies à 800 mètres; mais bientôt le Soleil agissant sur le gaz de l'aérostat, nous nous élevâmes progressivement jusqu'à 2000 mètres. La boussole indiquait la route de Brest. A 11 heures, nous étions à l'embouchure de la Loire, en face de l'Océan. Une descente rapide nous fit atterrir à temps. Nous avions parcouru la distance de Paris à Nantes en cinq heures. Un train spécial nous conduisit à Tours, où je vis les membres du Gouvernement et M. Thiers, alors de retour de sa patriotique tournée en Europe. De Tours, je me rendis à Marseille et à Oran, où je devais observer. J'avais choisi une station aux environs de la ville, à la Tour-Combes. Une mission anglaise, comptant parmi ses membres MM. Huyghens, Tyndall, l'amiral Onnaney, était venue également à Oran pour observer l'éclipse.

« Plusieurs jours avant le phénomène, le télescope était muni d'un corps nouveau et tout était disposé pour l'observation. Mais la fortune ne souriait pas alors à notre cher et malheureux pays; la pluie tombait à Oran depuis assez longtemps déjà et d'une manière tout à fait exceptionnelle. Cependant, pour augmenter nos chances, j'avais envoyé des

observateurs dans les provinces d'Alger et de Constantine, mais ce fut en vain; le jour de l'éclipse (22 décembre 1870), le ciel fut couvert presque partout en Algérie et il fut impossible de faire aucune observation nouvelle.

« En Sicile et en Espagne, quelques observations furent faites à travers des éclaircies du ciel. Les résultats furent analogues à ceux de l'année précédente. Il convient de citer spécialement la belle observation du professeur Young, qui constata le renversement du spectre à la base de la chromosphère.

« Cependant, ces observations laissaient encore la nature du phénomène indécise. Presque tous les observateurs avaient trouvé le spectre coronal continu, ce qui indiquait une couronne produite par des matières solides ou liquides, et cette opinion fut nettement avancée. D'un autre côté, la présence d'une raie lumineuse et celle de la polarisation, incontestablement constatée, accusaient, au contraire, un phénomène de nature gazeuse.

« Tel était l'état de la question en 1871, en présence d'une nouvelle éclipse qui devait avoir lieu en Asie et en Australie. Le phénomène excita une vive émulation en Europe. La France, l'Angleterre, l'Italie, la Hollande, reprirent une part active aux observations.

« J'eus l'honneur d'être désigné par le Gouvernement français et le Bureau des Longitudes. »

Observation de 1871. — « J'observai cette éclipse à Shoolar, dans les monts Neelgherry (Hindoustan), et je fus favorisé par un ciel d'une pureté que je n'ai jamais vue, ni avant, ni depuis.

« La totalité approchait. Je m'étais immédiatement tracé un programme, car l'éclipse totale était seulement de deux minutes; on ne pouvait songer qu'à quelques observations, mais tellement choisies qu'elles pussent lever définitivement les doutes qui planaient encore sur la nature de la couronne.

« Je devais m'attacher surtout à bien déterminer la véritable nature du spectre coronal, et si, comme je le croyais, il présentait les caractères d'un spectre de gaz, déterminer

quels sont ces gaz et quels rapports de nature ils présentent avec ceux des protubérances, terminer en examinant si les données de l'analyse spectrale s'accordent avec celles de la polarisation. Mais, avant tout, je devais consacrer quelques

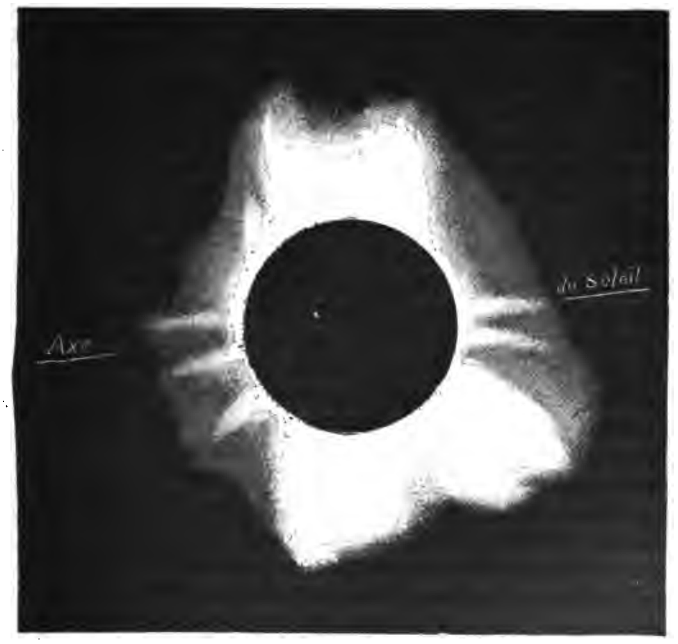


Fig. 31. — Éclipse solaire totale du 22 décembre 1889.
(Phase de totalité observée à Cayenne et montrant la couronne étalée de l'est à l'ouest.)

secondes à l'examen de la couronne dans la lunette pour me former une idée exacte du phénomène et arrêter les points où l'étude spectrale devait porter.

« Cependant, le Soleil va être complètement éclipsé : il est actuellement réduit à un mince filet lumineux qui, bientôt, se résout en grains séparés. Je fais tomber le verre obscur de la lunette et la couronne apparaît dans toute sa splendeur.

« Autour de la Lune brillent plusieurs protubérances, d'un rose corail, qui se détachent sur le fond d'une auréole lumineuse, de couleur blanche, mate et comme veloutée.

« Les contours de cette couronne sont irréguliers, mais assez nettement terminés. La forme générale est celle d'un carré curviligne centré sur le Soleil et débordant celui-ci d'un demi-rayon dans les parties les plus basses et de plus du double vers les angles. Aucune diagonale n'a la direction de l'équateur solaire. Cette couronne présente une structure très curieuse dont on peut se servir pour résoudre plusieurs points de théorie. On y distingue plusieurs traînées lumineuses qui, partant du limbe lunaire, vont se rejoindre dans les hautes parties de la couronne. L'apparence est celle d'une ogive ou d'un pétale de fleur de dahlia. Cette structure se répète tout autour de la Lune et, dans son ensemble, la couronne figure comme une fleur lumineuse gigantesque dont le disque noir de la Lune occuperait le centre.

« Je m'arrache à l'extase dans laquelle cet incomparable phénomène m'avait jeté un instant pour accomplir mon programme. J'examine si la couronne présente des différences essentielles au point de contact et au point opposé. Je ne trouve point de différence. Je suis alors quelques instants le phénomène, afin de voir si le mouvement de la Lune va apporter quelques changements importants dans la structure initiale de la couronne; or, rien de semblable ne se produit. Ces épreuves me donnent la conviction complète que j'ai devant les yeux l'image d'un objet réel situé au delà de notre satellite, et dont celui-ci découvre les diverses parties par les progrès de son mouvement.

« Ayant terminé cet examen, je reviens aux éléments lumineux du phénomène. Ma vue ayant encore toute sa sensibilité, je commence par l'examen du spectre des parties les plus hautes et les moins lumineuses de la couronne. Je place la fente du spectroscope à deux tiers de rayon environ du bord lunaire. Le spectre se montre beaucoup plus vif que je ne m'y attendais à cette distance, résultat qui tient évidemment au grand pouvoir lumineux de l'instrument et à l'ensemble des dispositions adoptées. Ce spectre n'est pas con-

tinu : je reconnais de suite les raies de l'hydrogène et la raie dite verte. C'est un premier point très important. Je déplace la fente en restant toujours dans les hautes régions de la couronne : les spectres présentent toujours la même constitution. Partant d'une de ces positions, je descends peu à peu vers la chromosphère, examinant très attentivement les changements qui peuvent se produire. A mesure que j'approche de la Lune, les spectres prennent plus de visibilité et paraissent s'enrichir, mais ils restent semblables à eux-mêmes comme constitution générale. Dans les hauteurs moyennes de la couronne, de trois à six minutes d'arc, la raie obscure D se perçoit ainsi que quelques lignes obscures dans le vert; mais celles-ci sont à la limite de visibilité. Cette observation prouve la présence dans la couronne de la lumière solaire réfléchie; mais on sent que cette lumière est noyée dans une émission lumineuse étrangère et abondante.

« J'aborde alors l'observation très importante qui doit me donner les rapports spéciaux entre la couronne et les protubérances. La fente est placée de manière à couper une portion de la Lune, une protubérance et toute la hauteur de la couronne.

« La protubérance donne un spectre très riche et d'une grande intensité; je n'ai point le temps d'en faire une étude détaillée. Le point capital, ici, est de constater que les principales raies de la protubérance se prolongent dans toute la hauteur de la couronne, ce qui démontre péremptoirement l'existence de l'hydrogène dans celle-ci.

« La raie verte, si vive dans le spectre de la couronne, paraît s'interrompre dans le spectre de la protubérance, résultat très remarquable. Je donne encore quelques instants pour bien constater la correspondance exacte des raies de la couronne avec les principales raies de l'hydrogène dans la protubérance.

« Ainsi, les deux analyses spectrale et polariscopique, bien interprétées, s'accordent sur cette double origine de la lumière coronale, et toutes les observations se réunissent pour montrer l'existence de ce milieu circumsolaire.

« La densité de l'atmosphère coronale doit être extrême-

ment faible. En effet, on sait que le spectre de la chromosphère, dans ses parties supérieures, est celui d'un milieu hydrogéné excessivement raréfié; or, comme le milieu coronal, d'après les indications spectrales, doit être infiniment moins dense encore, on voit à quelle rareté ce milieu doit atteindre. Cette conclusion est encore corroborée par des observations astronomiques. La science a enregistré le passage de comètes à quelques minutes seulement de la surface du Soleil; ces astres ont dû traverser l'atmosphère coronale, et, cependant, malgré la faiblesse de leur masse, ils ne sont pas tombés sur le Soleil. »

Conclusion. — « Pour résumer les conquêtes de l'analyse spectrale, relativement aux enveloppes gazeuses solaires, disons que l'application de cette méthode a permis d'en reconnaître trois bien distinctes, en laissant pour le moment de côté la lumière zodiacale, dont l'origine et la nature ne sont pas encore bien connues.

« Immédiatement au-dessus de la *photosphère*, qui est l'enveloppe dont le pouvoir émissif l'emporte sur tous les autres et qui donne à l'astre son pouvoir rayonnant, nous voyons d'abord une couche très basse, de quelques secondes à peine, formée de vapeurs métalliques, incandescentes, plus légères que celles que l'on trouve dans la photosphère; au-dessous vient la *chromosphère,* dont la hauteur véritable est de 8 à 12 secondes, couche encore très chaude où domine l'hydrogène avec de fréquentes injections de vapeurs métalliques de magnésium; enfin, l'*atmosphère coronale,* atmosphère très rare, très haute, beaucoup moins chaude, très tourmentée, atmosphère qui est rarement en équilibre et où déjà doivent se faire sentir ces phénomènes que la matière cométaire éprouve quand elle s'approche du Soleil. Toutes ces causes, associées à la présence au moins fréquente d'anneaux de météorites, concourent pour donner à cette enveloppe solaire cet aspect et ces formes bizarres qui ont défié pendant si longtemps la sagacité des astronomes. »

IX. — LES PLANÈTES

Constitution des planètes. — La constitution des planètes est aujourd'hui assez bien connue, grâce à l'emploi des instruments puissants dont disposent les astronomes modernes et surtout du spectroscope. En général, elles sont formées des matières que l'on rencontre sur la Terre et sur le Soleil, portées à des températures diverses, ce qui tendrait à confirmer les vues de Laplace touchant une origine commune de toutes les planètes, issues d'après lui de la substance du Soleil, comme nous l'avons indiqué plus haut.

Les planètes sont-elles habitées ? Telle est la question qui intéresse aujourd'hui le plus les personnes étrangères à l'Astronomie, car, pour les astronomes, cette question apparaît comme tellement insoluble à l'heure actuelle qu'il ne faut pas songer à la traiter avec quelque apparence de rigueur scientifique. On a démontré en effet que pour pouvoir découvrir des êtres vivants de l'ordre de grandeur de ceux que nous connaissons, sur un astre tel que la Lune, il faudrait des grossissements bien supérieurs à ceux que l'on peut espérer réaliser d'ici longtemps encore. En fait, la question est donc insoluble ; mais théoriquement peut-on admettre la possibilité de la vie sur les planètes que nous connaissons ? Le problème est encore très complexe ; si l'on suppose que la vie n'est possible que sous une forme analogue à celle que nous connaissons sur la Terre, la question peut entrer dans le domaine de la discussion : c'est ce qu'a tenté Faye, et on lira plus loin les considérations auxquelles il a été conduit. Mais cette supposition n'est pas la seule que l'on puisse faire. De quel droit affirmer qu'il n'est qu'une forme possible de la vie ? Peut-être la Nature est-elle capable de réaliser sur une planète brûlante comme Jupiter des êtres sentants et pensants, formés sans doute d'une façon et de matières différentes de celles que nous constatons sur la vie terrestre. Cette hypothèse n'a rien en soi de contradictoire, mais il faut avouer que nul ordre de faits n'en rend pour nous la discussion abordable ; aussi sort-elle du domaine proprement scientifique.

Les astronomes s'accordent aujourd'hui à penser que la Lune n'est pas habitable. D'abord elle ne possède pas d'atmosphère, ou, si cette atmosphère existe, elle doit être très raréfiée : voici les principales raisons qui fondent cette hypothèse.

Quand une étoile vient à passer derrière le disque solaire, elle

disparaît subitement : si la Lune était entourée d'une atmosphère, la lumière ne s'éteindrait que progressivement. De même les extrémités du croissant, au lieu de se prolonger par une lueur crépusculaire, qui serait due à l'éclairement de l'atmosphère, apparaissent comme très nettes.

Enfin on ne constate, lors des éclipses de Soleil, aucune auréole

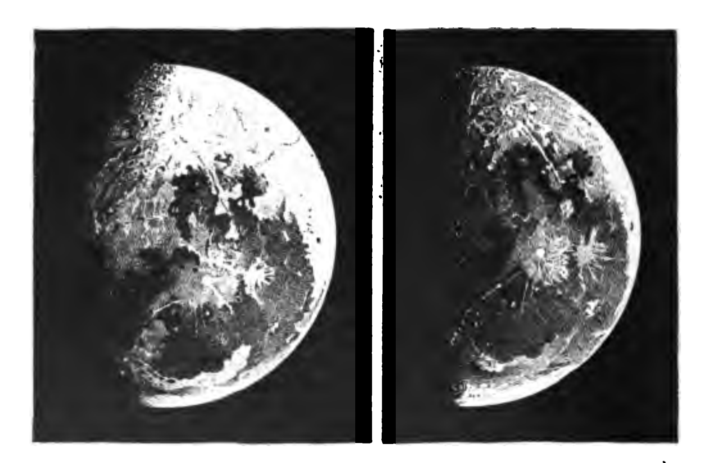


Fig. 32. — La Lune dans deux phases distinctes.

lumineuse ; et le spectre de la lumière lunaire n'est autre que celui de la lumière solaire, sans raies atmosphériques d'aucune sorte.

L'eau doit également faire défaut à la surface de la Lune, car elle produirait des nuages capables de modifier l'éclairement du disque lunaire ; or celui-ci demeure constant.

« Le résultat de cette enquête est (1), comme on le voit, défavorable à l'existence actuelle, en quantité appréciable, de l'eau, de l'air et de la glace sur la Lune. Les conditions climatériques ne sauraient donc y être que très âpres, non seulement dans la région polaire, à peine touchée d'un Soleil rasant, mais dans les zones équatoriales. Privées du manteau protecteur que nous font l'air et la vapeur d'eau,

(1) Lœvy et Puiseux, *Étude de la surface lunaire.*

elles subissent avec aggravation le même régime que les plus hautes montagnes terrestres : sécheresse extrême, rayonnement nocturne intense, température moyenne très basse. On ne saurait guère imaginer de milieu plus défavorable pour la vie; et comme les formes organisées, même les plus rudimentaires, manquent sur la Terre aux grandes altitudes, il est impossible de concevoir celles qui pourraient s'adapter à la Lune dans son état présent.

« La même solution semble valable, si haut qu'on veuille remonter dans le passé. Sans doute les éléments de notre atmosphère ont existé sur notre satellite : l'eau y a exercé, sous forme de vapeur, une action énergique et créé un relief plus accusé, dans l'ensemble, que celui de la Terre; mais elle y était déjà rare quand la température superficielle est descendue au point de condensation, presque entièrement absente quand elle s'est abaissée au point de congélation. Les conditions d'humidité et de température exigées par le développement des organismes terrestres ne se sont donc jamais trouvées réunies sur la Lune. Son histoire offre des traits communs avec l'évolution primitive de la Terre, aucun, à ce qu'il semble, avec la période contemporaine. La Lune nous apparaît donc comme un monde frappé d'un arrêt prématuré dans son développement, fixé sous sa forme définitive et devenu spectateur immuable de nos agitations. »

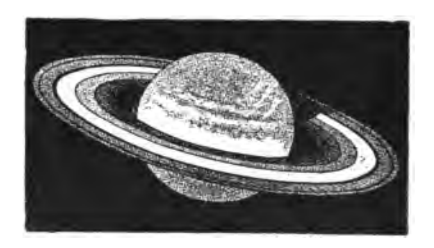


Fig. 33. — La planète Saturne et son anneau.

L'examen du disque lunaire nous montre que le sol y est fort accidenté et que la Lune a dû être, lors de sa formation, le siège de violentes convulsions géologiques. Ses montagnes, que l'on mesure au moyen de leurs ombres projetées, sont considérables relativement à son volume : les plus hautes (8 300 m.) atteignent le 1/200 de son rayon, tandis que sur la Terre l'Himalaya (8 840 m.) ne représente que le 1/720 du rayon terrestre (*fig.* 32).

On peut apercevoir aussi, avec les puissantes lunettes dont disposent les Observatoires modernes et qui rapprochent la Lune à 160 kilomètres, de longues raies blanchâtres, sorte de canaux profonds. On leur a donné le nom de rainures. Leur longueur va parfois jusqu'à des centaines de kilomètres, avec une largeur de 3 kilomètres et une profondeur de 500 mètres.

Il ne saurait donc y avoir de vie sur notre satellite. En est-il de même dans le reste de notre système solaire? Voici quelques explications de Faye à ce sujet.

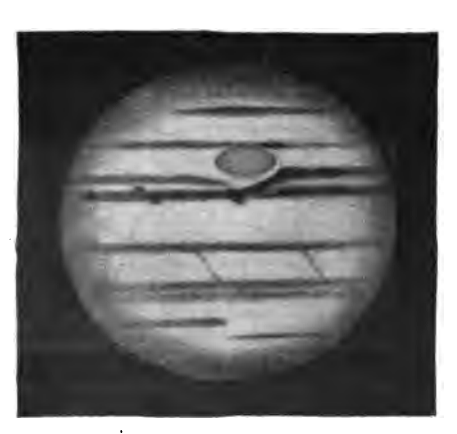


Fig. 34. — La planète Jupiter, avec ses bandes sombres, formées probablement par des nuages dont la configuration est variable.

« Lorsque l'Astronomie présentait la Terre comme le globe central autour duquel tous les astres étaient distribués à leur rang et à leur place; lorsque l'univers était figuré comme une vaste sphère creuse entourant notre globe, centrée sur lui, tournant régulièrement autour de lui avec son Soleil, sa Lune, ses planètes et ses étoiles, pour lui ménager toutes les conditions de la vie, la chaleur, la vicissitude des saisons, etc., l'homme pouvait se croire le centre de l'univers et le but unique de la création. Au XVII[e] siècle, toutes ces illusions ont disparu pour faire place au sentiment de notre isolement et de notre insignifiance matérielle en face des masses écrasantes de l'univers.

« Mais la satisfaction d'apprendre que deux ou trois esprits supérieurs avaient deviné le secret de notre isolement et de notre faiblesse était, il faut l'avouer, une maigre compensation pour tant d'illusions perdues. De là l'idée de la pluralité des mondes habités, avec laquelle Fontenelle et ses contemporains tâchent de dédommager les lettrés en leur

présentant l'univers comme un vaste ensemble de mondes indépendants qui assurent spontanément à la vie, dans toute sa plénitude et sous toutes ses faces, un développement illimité. La science actuelle, prise à la surface, semble confirmer ce courant d'idées médiocres qui a succédé effectivement aux doctrines de l'ancienne philosophie.

Conditions de température. — « Mais en y regardant de plus près, on verra que la science actuelle a d'autres tendances. Tâchons de les mettre en relief en examinant les conditions astronomiques de la vie, telle que l'analyse spectrale et l'étude approfondie de la constitution des astres nous permettent de les concevoir aujourd'hui ; et partant de cette idée simple, que ces conditions prises dans leur généralité doivent être partout les mêmes, considérons tout d'abord la première qui est relative à la température. Les germes quelconques ont besoin, pour conserver leur vie latente, que la température ne dépasse pas 60° et, pour se développer, qu'elle ne descende pas jusqu'à la congélation de l'eau. Sur la terre même, où les eaux, le sol et les airs sont si largement peuplés, il y a des régions où la vie disparaît par un petit abaissement de température, et d'autres où quelques degrés de plus la feraient également disparaître par un excès de chaleur.

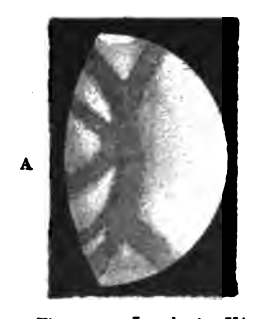




Fig. 35. — La planète Vénus dans deux phases différentes : A, 17 août 1890 ; B, 27 septembre 1890.
(Les accidents de la surface n'ont pas changé de place par rapport au cercle terminateur en ligne de séparation d'ombre et de lumière.)

« La condition de température exclut immédiatement tous les corps qui brillent de leur propre lumière, c'est-à-dire tous les astres que nous voyons au ciel (sauf les planètes). Depuis qu'on connaît mieux notre Soleil, personne ne rêve

plus d'étoiles habitées. Les nébuleuses ne comptent pas davantage, puisque le spectroscope nous y révèle les raies de l'hydrogène et de l'azote incandescents. Évidemment la vie ne peut se rencontrer que sur un globe déjà froid associé à un autre corps chaud, plus ou moins voisin, qui lui fournit à dose modérée la chaleur indispensable, sans le faire sortir de limites très étroites. Les soleils jouent précisément ce rôle-là par rapport à leurs planètes, et, chose sin-

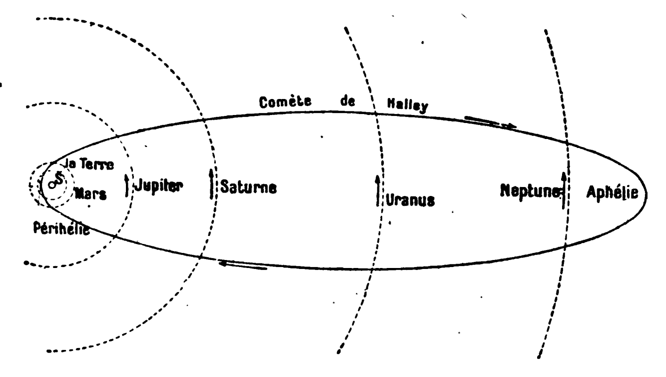


Fig. 36. — La comète de Halley.
Visible en 1910, elle le sera de nouveau dans 72 ans.

gulière, en vertu de leur isolement caractéristique, ils ne sauraient jamais être appelés eux-mêmes à recevoir la vie, même à l'époque de leur refroidissement.

« Et pourtant il s'en faut que les soleils soient propres à entretenir autour d'eux la vie. Excluons d'abord les étoiles variables, comme O de la Baleine, qui brille pendant quelque temps d'un éclat très vif (étoile de 2e grandeur), puis s'affaiblit peu à peu et reste invisible (réduite à la 14e grandeur) pendant une longue série de mois (période de 330 jours). Excluons aussi les étoiles trop faibles, déjà refroidies, ou de trop petite masse pour avoir jamais possédé une haute température, celles où l'analyse optique nous révèle, par les cannelures de leurs spectres, l'existence de combinaisons chimiques, car il est évident qu'un Soleil ne saurait entre-

tenir la vie qu'à la condition de n'en posséder lui-même aucune trace. Puis les étoiles colorées en rouge, en bleu ou en bleu verdâtre, dont la lumière manque de certaines radiations nécessaires au développement des êtres organisés. Excluons surtout les étoiles condensées par centaines et par milliers dans des espaces plus ou moins resserrés, où la température doit s'élever bien au delà des limites admissibles. Il nous reste bien des étoiles qui peuvent jouer le rôle de soleils en vertu de leur isolement, de l'intensité, de la nature et de la constance de leur radiation. Pour que des globes depuis longtemps refroidis soient placés et maintenus sous l'influence d'un de ces soleils, il faut qu'ils se meuvent autour de lui dans des orbites à peu près circulaires. Des orbites très excentriques, comme celles des comètes (*fig.* 36), produiraient des variations inadmissibles.



Fig. 37. — Comète : traînée obscure.

« La question se trouve ramenée à l'examen de systèmes analogues au nôtre : systèmes où nous allons rencontrer de nouvelles restrictions. En premier lieu, la condition de température exclut ces planètes dont l'axe de rotation serait trop peu incliné sur le plan de l'orbite : Uranus, par exemple, dont chaque hémisphère voit le Soleil pendant une demi-révolution à peu près (quarante-deux ans) et est plongé dans la nuit pendant la révolution suivante. Déjà, pour Vénus, l'inclinaison de son axe de rotation (37°) sur le plan de l'orbite est trop faible et doit donner lieu à de grandes variations de température. Il faut exclure encore les globes dont la rotation trop lente (la Lune) laisserait trop d'influence à la radiation nocturne, et ceux qui, comme Saturne, sont entourés d'anneaux opaques dont l'ombre, portée sur les régions les plus favorables au développement

de la vie, y produit çà et là périodiquement des éclipses continuelles.

« Mais ces conditions astronomiques seraient absolument insuffisantes, même au seul point de vue de la température, si ces globes n'étaient entourés d'une atmosphère capable d'absorber et de modérer la chaleur pendant le jour, et de s'opposer au refroidissement pendant la nuit. La Lune nous montre assez que cette condition peut n'être pas remplie. Il faut donc exclure, dans tout système, les planètes qui n'ont pas du tout ou assez d'atmosphère; et même une enveloppe formée exclusivement de gaz permanent ne suffirait pas : elle serait trop perméable à la chaleur; toute action modératrice serait trop limitée. Ce n'est que par la présence de l'eau à l'état liquide et par l'énorme quantité de calorique que ses changements d'état sont susceptibles d'absorber ici, pour la rendre libre plus loin, qu'une atmosphère peut remplir son rôle.



Fig. 38. — Comète de 1812.

« Résumons ces premières conditions qui traduisent celles de la température. Il faut, pour qu'un globe soit habitable, qu'il fasse partie d'un système isolé et stable; que l'astre central soit pourvu d'une photosphère à radiation complète et constante; que la rotation de ce globe et même sa distance au Soleil satisfassent à certaines conditions assez étroites; qu'il soit entouré d'une enveloppe gazeuse et en partie recouvert d'une certaine quantité de liquide dont les changements d'états ne s'écartent pas notablement des limites de température admissibles; enfin qu'il possède une masse bien supérieure à celle de ces cent trente-cinq

petits globes qui se meuvent entre les orbites de Mars et de Jupiter, sur lesquels une pierre lancée par la main d'un enfant pourrait devenir aussitôt un corps étranger, un satellite circulant indéfiniment autour de sa planète. »

Conditions géologiques. — « Viennent maintenant les conditions géologiques. La masse des eaux ne doit pas recouvrir entièrement le globe ; il faut des espaces suffisants de terrain solide émergé. Il faut, de plus, que l'équilibre des mers ainsi formées soit stable, c'est-à-dire que leurs mouvements se réduisent à de simples oscillations dans des bassins fixes.



Fig. 39. — Aspects de la comète de 1910 : *a*, le 24 janvier ; *b*, le 29 janvier.

« Saturne (*fig.* 33) nous présente un globe où cette dernière condition ne saurait être réalisée, puisque sa densité moyenne est inférieure à celle de l'eau. Jupiter (*fig.* 34), bien que sa densité moyenne dépasse un peu celle de l'eau, ne saurait offrir la réalisation de toutes ces conditions géologiques, car son aplatissement si marqué prouve bien que la densité superficielle doit être bien inférieure à celle de l'eau, et nous ne connaissons pas de matériaux capables de former, dans de pareilles circonstances, un sol résistant. Mars seul, avec la Terre, sans parler de Vénus (*fig.* 35) que nous connaissons peu, satisfait à cet ensemble de conditions astronomiques, physiques et géologiques. Encore faut-il avouer que l'aspect invariable de ses continents rouges, contrastant avec ses mers légèrement verdâtres, n'est guère favorable à l'idée d'une vie organique largement développée à la surface.

Conditions chimiques. — « Passons aux conditions chimiques que l'analyse spectrale nous rend désormais accessibles. Nous savons aujourd'hui que les éléments nécessaires à la vie sont largement répandus dans l'univers. Bien que l'azote et l'oxygène n'aient point été reconnus dans l'analyse spectrale du Soleil et des étoiles, l'existence du premier

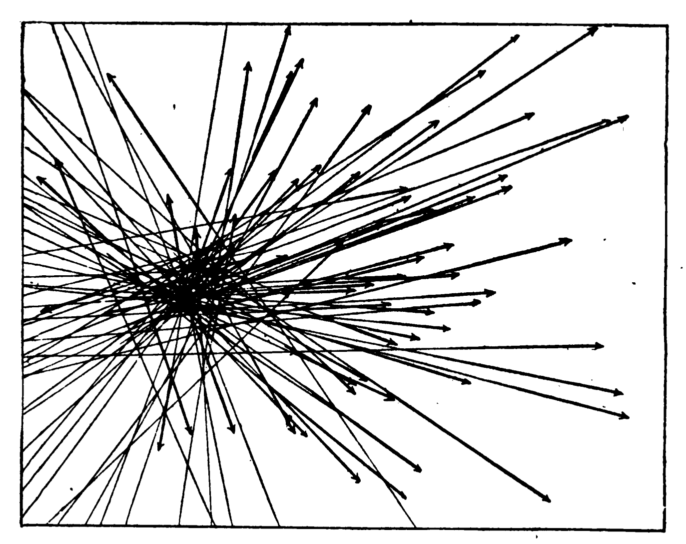


Fig. 40. — Trajectoires apparentes d'étoiles filantes, montrant l'existence du point radiant.

gaz a été constatée ou du moins rendue probable dans les nébuleuses; le second se retrouve jusque dans les pierres météoriques, presque entièrement composées d'oxydes terreux. L'hydrogène existe partout, dans le Soleil, les étoiles, les nébuleuses. Les fers météoriques en contiennent certaines quantités qui ont été absorbées par le métal à l'époque de sa formation et que l'on peut mettre de nouveau en liberté quand on les soumet à l'action de la chaleur. Le carbone n'a été retrouvé nulle part au moyen de l'analyse spectrale; mais les météorites charbonneuses prouvent son existence cos-

mique. Le calcium, et par suite la chaux, est très-répandu; le fer existe partout. Le soufre et le phosphore se retrouvent suffisamment dans les fers cosmiques. En un mot, les éléments chimiques de la vie semblent être abondamment répartis. Parmi les composés, nous savons reconnaître la présence de la vapeur d'eau dans les atmosphères de plusieurs corps célestes depuis que Janssen nous a donné son curieux spectre d'absorption.



Fig. 41. — Étoile filante à traînée sinueuse.

« Si cependant on examine les choses de plus près, on trouve que ces conditions chimiques sont bien étroites par certains côtés. D'une part, l'analyse des météorites semble établir que ces corps se sont formés dans un milieu peu riche en oxygène; d'autre part, l'oxygène libre ne peut résulter que d'un excès de ce gaz sur l'hydrogène absorbé dans la formation de l'eau. Il peut donc se former des atmosphères pauvres en oxygène ou même totalement privées de ce gaz. Citons, dans notre système, les atmosphères de Jupiter, de Saturne et surtout d'Uranus, comme devant avoir une composition assez éloignée de la nôtre. Leurs spectres, différents à certains égards du spectre tellurique, semblent en effet indiquer la présence de gaz ou de vapeurs composés

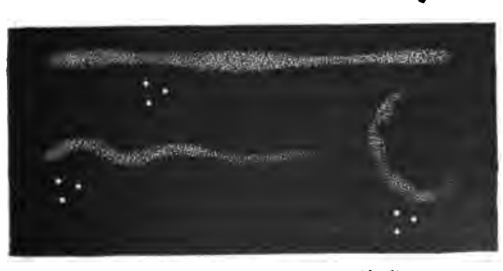


Fig. 42. — Changements de forme successifs d'une traînée d'étoiles filantes.

exerçant une absorption de nature inconnue pour nous.

« Si nous comparons la fin de notre siècle au début du XVII[e] siècle, nous reconnaîtrons dans la science actuelle une toute autre pensée scientifique. Tandis que la première produisait sur la foule surprise le sentiment de notre insignifiance contrastant avec les lois fatales d'un univers écrasant et à jamais fermé pour nous, la seconde nous fait entrevoir dans cet univers même la trace lumineuse d'une pensée suprême, au lieu de combinaisons sans objet de forces inconscientes. »

D'ailleurs l'azote, l'oxygène et la vapeur d'eau sont par eux-mêmes absolument insuffisants. Si notre atmosphère et nos eaux venaient à être privées des faibles traces d'acide carbonique qu'elles contiennent, la vie ne tarderait pas à disparaître de la surface de ce globe. Il en serait encore de même si la proportion de ce gaz dépassait certaines limites.



Fig. 43. — Étoile filante à traînée fusiforme.

« Plus on s'approche du domaine des sciences naturelles, et plus on voit se rétrécir les conditions de la vie organique, même à ses degrés inférieurs. Bien loin de pouvoir admettre *à priori* qu'elles se trouvent naturellement réalisées partout, c'est à peine si l'on peut citer en dehors de la Terre deux planètes de notre système où elles soient seulement probables, et le seul globe sur lequel il soit permis de se prononcer avec une entière certitude, la Lune, n'en possède aucune. En revanche, cette étude nous montre que ces conditions nous rattachent jusqu'à un certain point à l'univers lui-même. »

Comètes. — Les comètes n'ont point l'importance que l'antiquité et le moyen âge leur avaient attribuée. Newton a reconnu

qu'elles décrivent des orbites elliptiques très allongées (*fig.* 36). Leur densité est extrêmement faible, à tel point qu'on a pu les appeler des « riens visibles ». Elles subissent de grandes variations de température à mesure qu'elles s'approchent du Soleil et augmentent alors beaucoup de luminosité par suite de la volatilisation de toutes les substances qu'elles renferment. Le spectroscope montre qu'elles sont formées de gaz très raréfiés (*fig.* 38 et 39).

Étoiles filantes. — Les étoiles filantes, dont les essaims reviennent à époques à peu près fixes, ce sont des restes d'anciennes comètes, désagrégées pour une raison ou pour une autre. C'est ce qu'on a pu vérifier pour la comète de Biéla en 1846, en 1872, en 1885. Les fragments assez petits qui les constituent deviennent lumineux en pénétrant dans notre atmosphère à une vitesse qui va parfois jusqu'à 100 kilomètres à la seconde : le frottement de l'air, considérable à cette vitesse, détermine l'inflammation de la masse. Les étoiles filantes suivent une direction bien déterminée, comme le montre l'existence des *points radiants* (*fig.* 40), ou *centres d'émanation* d'où elles semblent toutes provenir. Leur chute sur la Terre produit les bolides ou aérolithes.





X. — LES ÉTOILES

Les anciens, comme on le sait, imaginaient les étoiles fixées à une sphère qui représentait pour eux la limite même de l'univers, et dont la Terre occupait le centre. Conception qui nous surprend aujourd'hui, mais qui trouve pourtant une certaine base dans ce fait que toutes les étoiles nous apparaissent à la même distance par suite de leur éloignement considérable. Le système de Copernic et de Galilée ruina théoriquement cette façon de concevoir l'univers, et l'on en vint à penser que les étoiles, au lieu de se répartir sur une sphère unique, pourraient bien être situées à des distances formidables les unes des autres. La preuve expérimentale de cette affirmation ne put être fournie qu'au XIXe siècle, quand les instruments furent devenus assez précis pour mesurer les angles infiniment petits qui servent à calculer la distance des étoiles. Cette distance, qui n'est d'ailleurs connue que pour un petit nombre d'étoiles, est énorme et dépasse tout ce que l'esprit humain croyait pouvoir imaginer.

La distance du Soleil à la Terre est de 150 millions de kilomètres. Or, l'étoile la plus rapprochée de nous se trouve 300 000 fois plus loin que le Soleil. Sirius, la plus belle étoile du ciel, brille à une distance deux fois plus grande. On sait que la lumière, dont les anciens croyaient la transmission instantanée, parcourt 300 000 kilomètres à la seconde. Elle met donc 4 ans 1/2 pour nous parvenir de l'étoile la plus rapprochée, et 9 ans pour venir de Sirius. On pense, en partant de considérations assez plausibles, que la lumière met 140 ans pour nous arriver des dernières étoiles visibles à l'œil nu, et 3 000 pour nous venir des plus petites étoiles qu'Herschel distinguait avec son grand télescope.

Par la variation de certaines distances angulaires des étoiles, on a pu constater que le Soleil lui-même n'est pas immobile, mais qu'il se meut vers la constellation d'Hercule à une vitesse de 30 kilomètres à la seconde. La petitesse de ce mouvement est telle par rapport aux dimensions des distances interastrales qu'il n'en résulte dans l'aspect de la voûte céleste aucun changement appréciable pour notre œil dépourvu d'instruments. Seuls, plusieurs milliers de siècles rendraient peut-être cette modification sensible.

Le Soleil n'est donc qu'une étoile, de grandeur et d'éclat moyens, et les milliers d'étoiles qui peuplent le firmament sont toutes des

soleils, quelques-uns sans doute infiniment plus gros et plus lumineux que le nôtre. Vraisemblablement autour de ces étoiles circulent des planètes que nous ne pouvons apercevoir à cause de leur petitesse et parce qu'elles sont noyées dans la lumière de l'astre central. De même, d'une étoile, la Terre passerait inaperçue aux yeux des observateurs.

Constitution des étoiles. — Janssen, qui s'est illustré par l'étude du Soleil, nous a laissé aussi d'intéressantes observations touchant la constitution des étoiles. Voici ses réflexions concernant l'*âge des étoiles :*

« Le mot âge suppose une existence qui a un commencement, un développement, une fin : l'âge implique un cycle de phénomènes justiciables du temps. Ce qui est éternel n'a point d'âge.

« L'âge des étoiles signifie donc que ces astres sont soumis aux lois d'une évolution semblable à celle que nous offrent sur notre globe les êtres organisés.

« Ainsi, ces étoiles dont la lumière paraît extraterrestre et d'une nature toute céleste, ces étoiles dont la fixité a été si souvent prise comme le symbole de l'immobilité elle-même, ces étoiles que notre éducation, nos traditions nous avaient habitués à considérer comme les flambeaux éternels des cieux, seraient donc soumises, comme nos existences terrestres, aux lois de la naissance et de la mort; elles seraient, elles aussi, justiciables du temps et éprouveraient les vicissitudes que toute vie puise en elle-même. Telle est cependant la vérité. Les étoiles sont des soleils analogues au nôtre, et elles sont soumises aux lois d'une évolution d'où résulte pour elles un commencement, une période d'activité, un déclin, une fin.

Herschel et les nébuleuses.— « Vers le milieu du XVIIIe siècle s'élève une homme qui a été le plus laborieux et peut-être le plus grand observateur qui ait existé; un homme qui, parti d'une carrière modeste et toute différente, a créé son éducation scientifique, les instruments, les méthodes dont il s'est servi ; qui a fait à lui seul un nombre de découvertes capable de fournir à dix réputations, et qui a eu comme lé-

gitime récompense de voir, parmi ses contemporains, son nom devenir comme le symbole de l'Astronomie et ses idées reçues comme les vérités de la science elle-même : c'est William Herschel.

« Parmi les immenses travaux d'Herschel, nous ne considérons que les nébuleuses, parce que c'est par les conclu-



Fig. 41. — Nébuleuse spirale des *Chiens de chasse*.

sions qu'Herschel a tirées de ses observations sur les nébuleuses que l'idée d'évolution est entrée dans le ciel.

« Herschel découvre à lui seul la meilleure partie du ciel des nébuleuses. Il en trouvait 70 à 80, il en laisse 2 500.

« De l'immense revue qu'il fait de ces astres aux formes si souvent étranges, il dégage une grande et magistrale idée qu'il fait sienne et qui est devenue populaire depuis. Cette idée, tout le monde la connaît, tant elle a plu aux esprits par sa simplicité et sa grandeur. La voici :

« Les nébuleuses présentent souvent des points brillants, et ces points, si, au lieu de les considérer dans une seule né-

buleuse, on les suit dans un grand nombre de ces astres, se montrent alors entourés de nébulosités plus ou moins étendues. Il semble que ces noyaux nous offrent tous les degrés de condensation de la matière qui les forme, depuis le plus diffus jusqu'à l'étoile la mieux formée.

« L'idée qui se présente alors à l'esprit d'Herschel est que



Fig. 45. — Nébuleuse spirale du *Triangle*.

les nébuleuses nous montrent les astres en voie de formation.

« Les étoiles ne seraient donc que de la matière nébuleuse qui se serait condensée et aurait donné naissance à des soleils et aux corps qui leur forment cortège.

« Vous voyez sur quel ensemble de faits Herschel base sa théorie. Ce n'est pas en considérant une nébuleuse qu'il peut la justifier. En effet, pour assister à des transformations qui auraient pour résultat la formation d'une étoile en partant du nuage nébulaire, il faudrait disposer de périodes devant lesquelles la vie, et sans doute la science humaine, ne représentent qu'un instant ; non, c'est par la considération d'une série d'astres où la formation existe à divers degrés. Herschel imite le naturaliste qui, parcourant une forêt, observe

des arbres d'une même essence à des âges divers, et conclut de ses observations le cycle que parcourt la plante aux diverses époques de son existence. Ajoutons maintenant que la conception d'Herschel, à savoir que les nébuleuses non résolubles sont formées de matières cosmiques, et non d'étoi-



Fig. 46. — Nébuleuse de la *Dorade*.

les que leur éloignement empêchera de séparer, se trouve confirmée d'une manière éclatante par l'analyse de Huyghens (1), qui trouve effectivement qu'elles présentent les caractères des gaz incandescents.

---

(1) Certaines nébuleuses, en effet, sont résolubles, c'est-à-dire qu'à un fort grossissement on s'aperçoit qu'elles sont composées uniquement de points brillants. D'autres ne pourront jamais le devenir, quelle que soit la puissance de l'instrument, parce qu'elles sont constituées par des agglomérations de gaz lumineux, comme le montre l'étude de leur spectre : par exemple, la nébuleuse du Dragon. On doit cette découverte à Huyghens (1864). Il observa des spectres de nébuleuses composés uniquement de quelques raies brillantes. « Un examen plus attentif me

Étoiles. — « Les étoiles, dit Janssen, sont de simples points brillants. Les plus puissantes lunettes nous les montrent encore telles. Et même, plus une lunette est parfaite, plus le point doit être petit. Ce point est entouré d'anneaux lumineux et souvent affecté de phénomènes de scintillation. Les anneaux tiennent à la constitution du mouvement lumineux lui-même, la scintillation à notre atmosphère. Dans tout cela rien qui regarde l'image elle-même, sinon pour la défigurer. La lunette n'est donc pas l'instrument de cette recherche : il faut une autre méthode.

« Cette méthode est celle dans laquelle on sépare les rayons élémentaires envoyés par l'astre étudié. Au lieu de considérer la lumière au point de vue des images qu'elle peut nous donner, on en fait l'analyse, et cette analyse nous révèle la nature chimique du corps qui envoie la lumière, et même de ceux qui, placés sur le trajet des rayons, les peuvent modifier par voie d'absorption.

Analyse spectrale. — « Examinons maintenant sur quelles bases la science s'appuie pour assigner l'âge relatif des étoiles.

« C'est par la considération du spectre fourni par ces astres qu'elle procède.

« On peut admettre d'une manière générale que, quand un Soleil est formé, toutes choses égales d'ailleurs, plus la température de cet astre est élevée, plus il remplira suffisamment les fonctions d'astre rayonnant, et plus longue sera la période pendant laquelle il pourra les remplir.

« Or cette température se trahit par des caractères spectraux. En effet, cette admirable image prismatique qui nous montre l'ensemble des rayons qu'un astre nous envoie, séparés, classés, ordonnés, et où nous savons lire aujourd'hui la composition chimique, le mouvement et tant d'autres données précieuses, nous instruit encore sur sa température : si

---

montra, dit-il, deux autres lignes brillantes du côté du bleu, ces trois lignes étant séparées par des intervalles relativement noirs. L'énigme des nébuleuses était résolue. La lumière elle-même nous avait envoyé la réponse : ce n'est pas une agglomération d'étoiles, mais un gaz lumineux. »

le corps était simplement échauffé sans être porté à l'incandescence, son spectre nous avertirait de cette circonstance par l'absence de ces rayons qui nous donnent la sensation de la lumière. Mais dès que l'incandescence se produit, les rayons lumineux et photographiques se montrent. Quand elle se prononce encore plus, le spectre s'enrichit du côté du

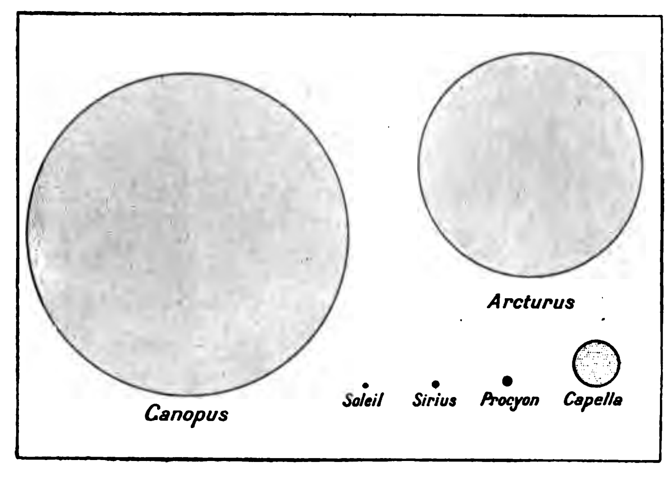


Fig. 47. — Grandeurs comparées de quelques étoiles.

violet, qui est toujours l'indice d'une haute température. Que si la température s'élevait encore, le violet et les rayons invisibles qui le suivent deviendraient plus abondants. On peut même concevoir, par une sorte d'abstraction, un corps qui serait porté à une température telle qu'il n'émettrait plus que de ces rayons invisibles situés au delà du violet, que l'œil ne percevrait plus et qui seraient seulement révélés par la photographie, la fluorescence et les appareils thermoscopiques. Ainsi, dans l'échelle croissante des températures, le corps tout d'abord n'est pas visible : il le devient ensuite et cesse de nouveau de l'être par l'excès même de cette température.

« Le spectre traduit fidèlement tous ces états et nous per-

met d'en lire, avec une fidélité admirable, les plus délicates circonstances.

« En s'appuyant sur ces faits, on admet que la température d'une étoile, ou tout au moins la température de ses enveloppes extérieures, sera d'autant plus élevée que son spectre sera plus riche en rayons violets.

« Il existe un grand nombre d'astres dont le spectre est développé du côté du violet. Ce sont ceux en général dont la lumière nous paraît blanche ou bleuâtre.

Étoiles blanches. — « La plus remarquable est cette magnifique étoile *Sirius* (*fig.* 47), qui, par le volume de lumière qu'elle nous envoie, est comme hors de pair dans le ciel. Le volume de cet astre est énorme et incomparablement plus grand que celui de notre Soleil. Il est enveloppé d'une vaste atmosphère d'hydrogène, ainsi que son spectre en témoigne. Il contient sans aucun doute les autres métaux, mais la présence de ceux-ci est d'une constatation difficile, sans doute à cause de la puissance même de rayonnement des vapeurs de ces métaux. Tout indique ici, d'après les théories, un Soleil dans toute la puissance de son activité, et qui conservera cette activité pendant d'immenses périodes de temps.

« Après Sirius, qui est l'ornement de notre ciel et qui le sera longtemps encore, d'après les indications de la science, nous trouvons, comme étoile entourée d'une vaste atmosphère hydrogénée, l'étoile *Véga*, de la constellation de la Lyre. C'est une étoile blanche qu'on remarque souvent en été, dans les régions zénithales de notre ciel. On admet que la masse de ce Soleil est portée à une haute température, et qu'il a devant lui de longues périodes d'activité et de rayonnement. »

Étoiles jaunes. — « Ces deux exemples d'étoiles dans tout le développement de leur activité solaire sont peut-être les plus remarquables, mais ils ne sont pas les seuls. Il existe un nombre considérable d'étoiles appartenant à cette classe. Disons même que le plus grand nombre d'étoiles visibles à l'œil nu sont dans ce cas. Mais on a découvert en

même temps une autre classe d'étoiles dans lesquelles les caractères de leur spectre indiqueraient un degré de condensation plus avancé. A la place de ces vastes atmosphères d'hydrogène, l'analyse montre une couche gazeuse plus basse, plus dense, formée de ces vapeurs métalliques que nous reconnaissons précisément dans notre Soleil, car notre astre central appartient à cette classe d'étoiles dont les fonctions solaires semblent encore puissantes, mais cependant ont dépassé ce que l'on pourrait appeler la jeunesse, si l'on veut me permettre cette expression. Chose remarquable : en général la couleur de ces étoiles se trouve être en rapport avec leur constitution. Elle n'a plus cet éclat, cette blancheur qui caractérise les étoiles de la première classe. Quelques-unes même sont de couleur jaune, et même orangée.

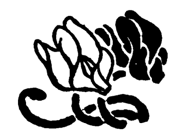
« Citons comme exemples de ces étoiles qui ont dépassé la période la plus active de leur rayonnement : d'abord notre Soleil, puis l'*Aldébaron*, ou l'Œil-de-Taureau, qui est sur la route du Soleil et qui brille en hiver au-dessus de la célèbre constellation d'Orion ; *Arcturus*, la belle étoile du Bouvier, qui se trouve dans le prolongement des étoiles de la queue de la Grande Ourse, et dont les feux rouges décèleraient l'évolution déjà avancée. »

Étoiles rouges. — « Mais il existe aussi des astres parvenus à un degré plus prononcé encore de leur évolution sidérale. Ici le spectre montrerait les signes d'un refroidissement fatal. Le violet, cette couleur des hautes températures, manque ici presque absolument ; en même temps, des bandes sombres, indice d'une atmosphère épaisse et froide, où les affinités chimiques commencent déjà leur œuvre d'association, envahissent le spectre. Chose remarquable, la couleur de ces astres répond en général à ces conditions admises comme signes de décrépitude ; elle devient orangé et passe souvent au rouge sombre.

« Tels sont les premiers résultats d'une étude qui commence seulement. J'ai tenu à la présenter dans sa simplicité, à écarter les difficultés, les objections qu'elle peut légitimement soulever dans les applications. C'est que je suis

persuadé que ces difficultés, la science en triomphera, comme elle a triomphé de difficultés bien plus considérables, et que les bases de la méthode seront définitivement posées.

« Cette méthode nous conduira à admettre définitivement ce grand principe d'évolution qui est appelé à devenir un des plus féconds de la Science astronomique. »





CONCLUSION

Ces paroles d'un des plus grands savants français peuvent nous servir de conclusion : le principe de l'évolution, en effet, ne représente pas seulement une conquête des sciences de la vie, il trouve aussi sa confirmation dans l'Astronomie physique.

Nous avons montré combien la Mécanique céleste avait contribué à préciser notre idée de la Science comme savoir mathématique ; l'Astronomie physique ne présente pas moins d'intérêt : outre les services qu'elle rend à la Physique et à la Chimie, il faut noter aussi ce qu'elle apporte à notre conception générale et philosophique de l'Univers.

On sait combien l'idée d'évolution dans le domaine de la vie a eu de peine à se substituer à la doctrine trop facile des créations successives. Un seul point reste profondément obscur : quelle origine faut-il attribuer à la vie? Les célèbres expériences de Pasteur nous conduisent à dire que, dans les limites de notre expérience actuelle, il n'y a pas de passage possible de la matière brute à la matière vivante. Mais un tel passage est-il impossible en soi? Excède-t-il les forces de la Nature? c'est ce qu'on ne saurait décider sans précipitation : car notre idée de la vie, aussi bien que celle des lois physico-chimiques, est trop obscure, malgré les progrès réalisés, pour que nous puissions montrer une incompatibilité définitive entre elles. Recourir à l'idée de création est sans doute un expédient désespéré, peu philosophique, et, comme le montre l'histoire des sciences, uniquement provisoire : mieux vaudrait avouer son ignorance et souhaiter simplement que des expériences plus précises viennent nous éclairer un jour.

L'Astronomie physique et les hypothèses qu'on en a tirées

nous semblent diminuer l'obscurité du problème. Il faut abandonner, en effet, l'antagonisme que les cosmogonies anciennes, et la cosmogonie biblique en particulier, établissaient entre la Matière et l'Ordre : la matière semblant incapable de parvenir à quelque systématisation que ce soit, à moins qu'un ordre extérieur à elle ne vienne la mouvoir et l'unifier. Les lois physiques et chimiques, en effet, sont déjà de l'Ordre et nous avons vu qu'en supposant un chaos primitif, on pouvait, par la seule force des lois naturelles, parvenir à un état harmonique comme celui du système solaire. Au nom de quoi alors affirmerait-on que la Nature ne peut dépasser ce stade, et qu'après avoir organisé l'Infiniment grand, elle ne saurait organiser l'Infiniment petit?

Une telle hypothèse n'aurait rien de matérialiste. Concevoir un Ordre immanent à la Matière, et capable de produire par une nécessité interne des formes d'existence de plus en plus harmonieuses, mènerait plutôt à l'Idéalisme. A l'inertie, regardée autrefois comme une propriété essentielle de la Matière, succède aujourd'hui la notion de l'atome-tourbillon, sorte de système solaire aux vitesses énormes, immense réservoir d'énergie. L'antique dualité de la Matière et de l'Ordre n'a pas non plus grande valeur. La synthèse de ces deux termes serait peut-être seule capable d'exprimer ce progrès continu qui, sans doute, représente aussi bien la loi de l'Esprit humain que celle de l'Univers.

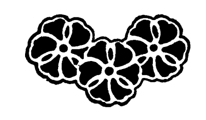
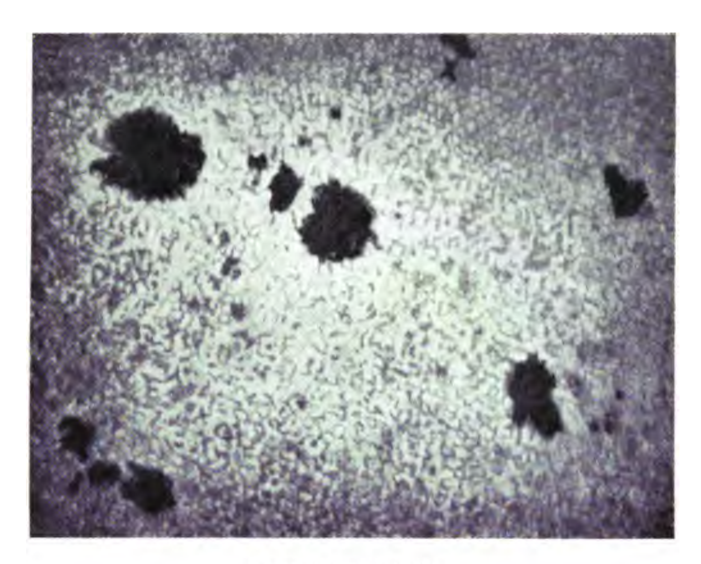


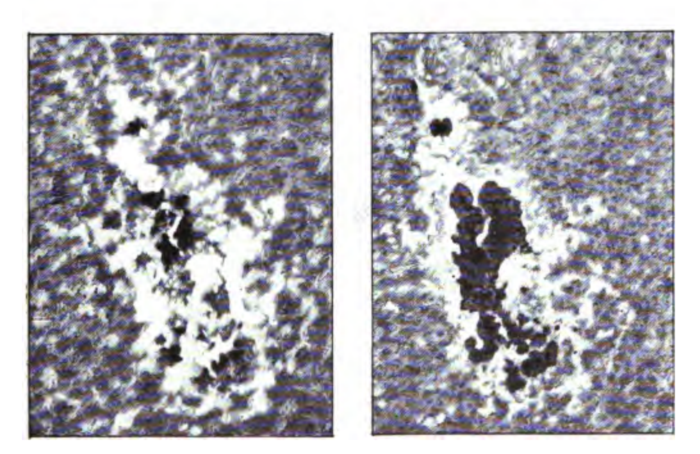
TABLE DES MATIÈRES

Paris. — Imp. LAROUSSE, 17, rue Montparnasse.

PROTUBÉRANCES SOLAIRES (ÉCLIPSE TOTALE DU 28 MAI 1908).
D'après une photographie obtenue par M. le professeur Langley.



TACHES SOLAIRES
(D'après une photographie obtenue à l'observatoire de Meudon).



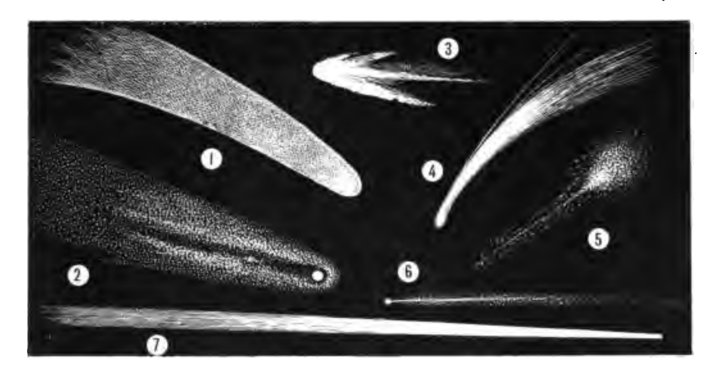
LA GRANDE TACHE SOLAIRE D'OCTOBRE 1903
(Vue montée pour être examinée au stéréoscope).





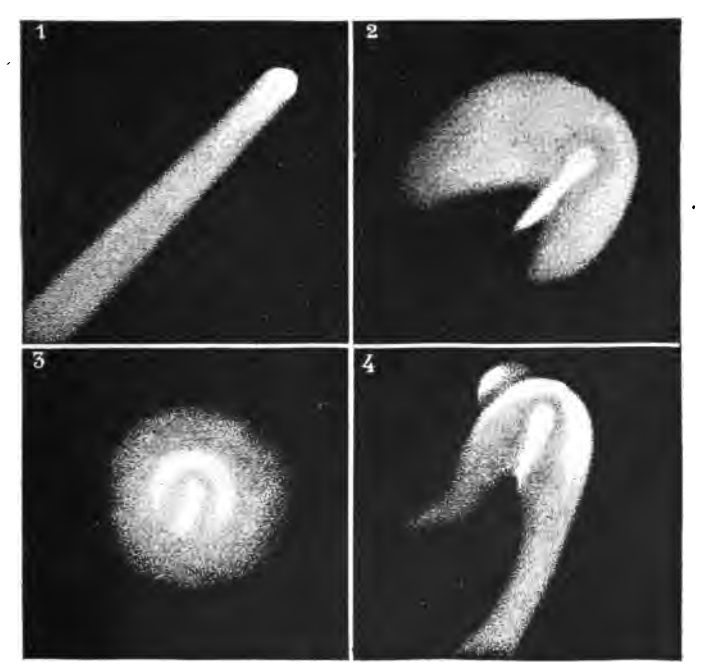
PROTUBÉRANCES ET COURONNES SOLAIRES

Éclipse totale du 16 avril 1893, observée à Fountioum (Sénégal).
(Photographie de M. Deslandres.)



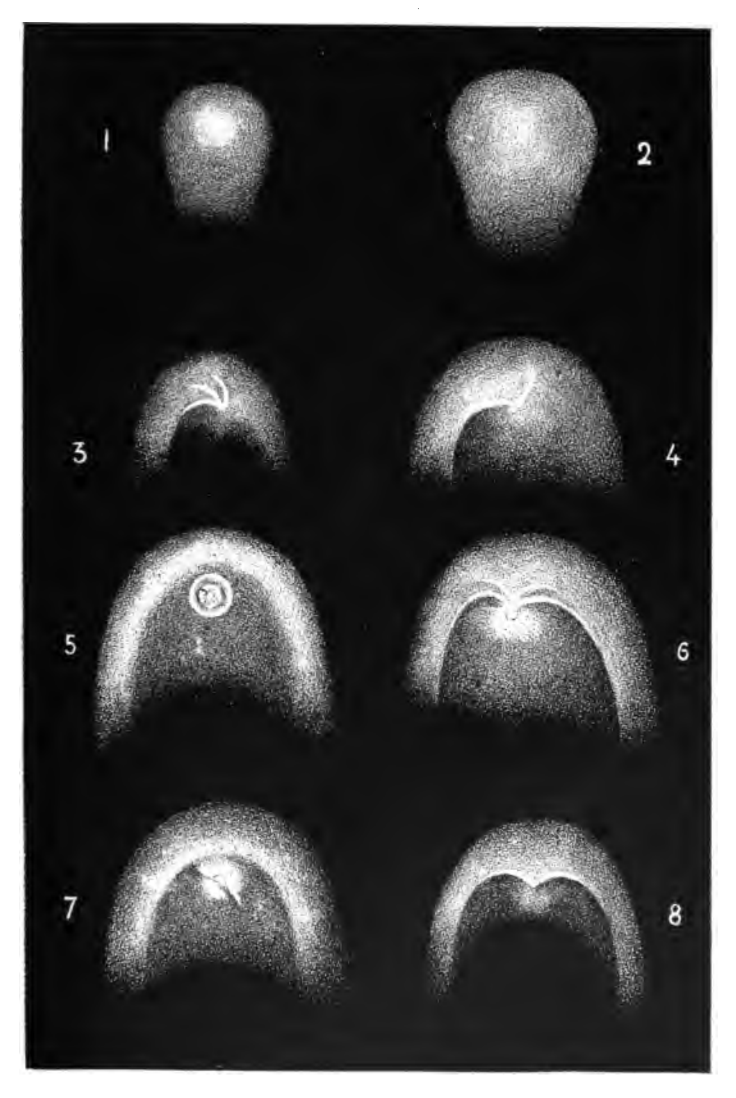
DIFFÉRENTES FORMES DE COMÈTES

1. Comète de 1811 ; 2. Comète de 1874 ; 3. Comète de 1881 ; 4. Comète de 1858 ; 5. Comète de 1873 ; 6. Comète de 1861 ; 7. Comète de 1843.



LA COMÈTE DE HALLEY EN 1835, D'APRÈS J. HERSCHEL

1. Vue dans la lunette de 7 pieds de foyer ; 2, 3, 4. Détails de la tête de la comète depuis octobre 1835 jusqu'à février 1836.

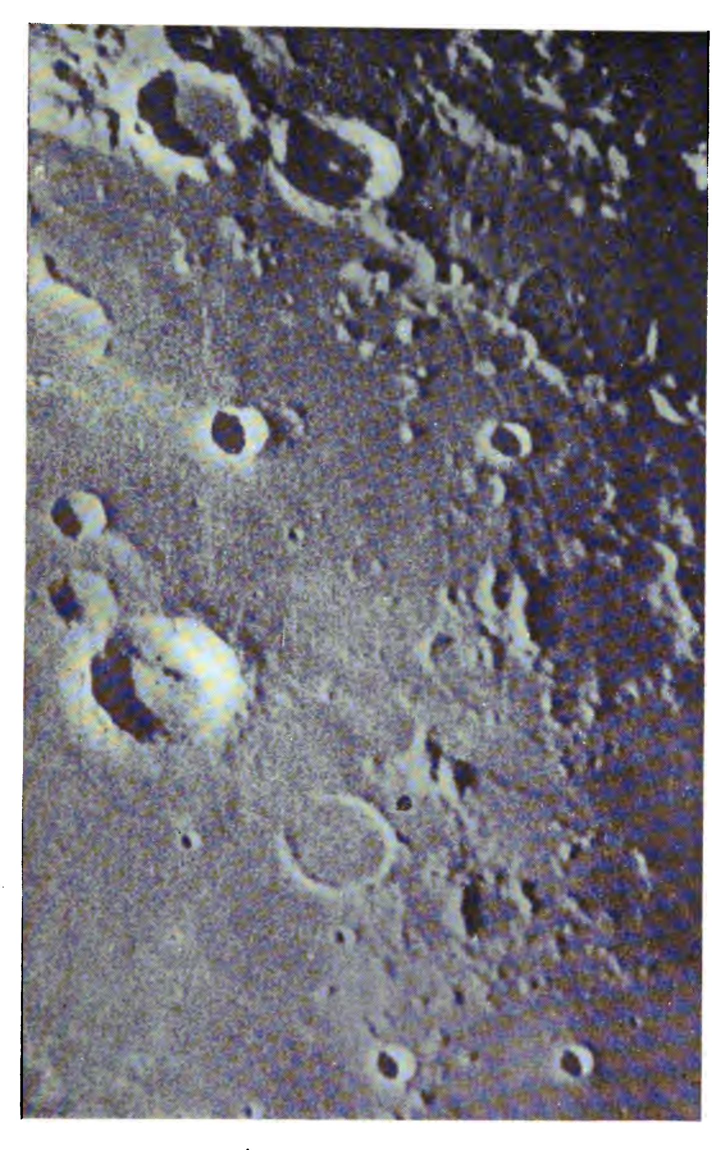


LA COMÈTE PONS DANS SES DIFFÉRENTS ASPECTS
AU VOISINAGE DE SON PASSAGE AU PÉRIHÉLIE.



PHOTOGRAPHIE DE LA COMÈTE BROOKS,
LE 10 NOVEMBRE 1893 (D'APRÈS M. BARNARD).

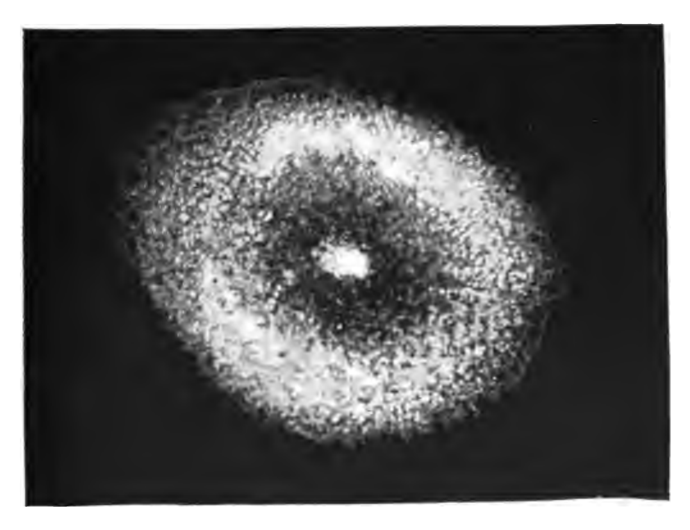
Les étoiles apparaissent ici sous forme de traînées blanchâtres dues à la différence existant entre le mouvement propre de la comète et le mouvement diurne de la sphère céleste.



LA LUNE : CRATÈRE BULLIALDUS ET SES ENVIRONS
(D'après une photographie de W. Prinz).
ÉCHELLE : 1 millimètre pour 420 mètres environ.



DIMENSIONS COMPARÉES
DES PLANÈTES PRINCIPALES DU SYSTÈME SOLAIRE
1. Mercure. — 2. Mars. — 3. Vénus. — 4. La Terre. — 5. Neptune.
6. Uranus. — 7. Saturne. — 8. Jupiter.



NÉBULEUSE ANNULAIRE DE LA LYRE
(D'après une photographie obtenue à l'observatoire d'Alger).

Bibliothèque Larousse

LITTÉRATURE (Suite)

Molière : Théâtre complet illustré. Avec biographie et notes, par Th. COMTE, agrégé de l'Université. *Sept volumes* illustrés de 63 gravures dont 36 hors texte. Chaque volume, broché, 1 fr. ; relié toile . . . . 1 fr. 30
En *deux volumes*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 13 francs

La Fontaine : Fables illustrées. Avec biographie et notes, par M. MOREL, agrégé de l'Université. *Deux volumes* illustrés de 28 gravures dont 4 hors texte. Chaque volume, broché, 1 fr.; relié toile souple . . . . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 4 fr. 50

Boileau : Œuvres poétiques illustrées. Avec biographie et notes, par L. COQUELIN. 8 gravures et un autographe. Broché, 1 fr.; relié toile. . . . 1 fr. 30
En reliure demi-peau, tête dorée . . . . 3 francs

La Bruyère : Les Caractères. Avec biographie et notes, par René PICHON, agrégé de l'Université. *Deux volumes* illustrés de 8 gravures hors texte. Chaque volume, broché, 1 fr.; relié toile souple. . . . . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée. . . . . 4 fr. 50

Bossuet : Œuvres choisies illustrées. Avec biographie et notes, par Henri CLOUARD. *Deux vol.* 18 grav. Chaque volume, broché, 1 fr.; relié toile. 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 4 fr. 50

Mme de La Fayette : La Princesse de Clèves. Avec biographie et notes, par L. COQUELIN. 9 gravures dont 2 hors texte. Broché, 1 fr.; relié toile. 1 fr. 30
En reliure demi-peau, tête dorée. . . . . 3 francs

Saint-Simon : Mémoires (extraits). Avec biographie et notes, par Aug. DUPOUY, agrégé de l'Université. *Quatre volumes* illustrés de 17 gravures hors texte. Chaque volume, broché, 1 fr.; relié toile. . . . . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 7 francs

Abbé Prévost : Manon Lescaut. Avec biographie et notes, par GAUTHIER-FERRIÈRES. 11 gravures. Broché, 1 fr. ; relié toile . . . . 1 fr. 30
En reliure demi-peau, tête dorée. . . . . 3 francs

J.-J. Rousseau : Les Confessions (extraits). Avec biographie et notes, par H. LEGRAND, agrégé de l'Université. 6 grav. Broché, 1 fr.; relié toile. 1 fr. 30

Voltaire : Romans. Avec biographie et notes, par H. LEGRAND. *Deux volumes* illustrés de 6 gravures. Chaque volume, broché, 1 fr. ; relié toile. . . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 4 fr. 50

Beaumarchais : Théâtre choisi illustré. Avec biographie et notes, par M. ROUSTAN, agrégé de l'Univ. *Deux vol.* 8 grav. Chaque vol., br., 1 fr. ; rel. t. . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 4 fr. 50

Chateaubriand : Œuvres choisies illustrés. Avec biographie et notes, par DUPOUY, agrégé de l'Université. *Trois volumes* illustrés de 17 gravures dont 13 hors texte. Chaque volume, broché, 1 fr.; relié toile . . . . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . 6 francs

Stendhal : La Chartreuse de Parme. Avec biographie et notes, par DUPOUY. *Deux vol.* 4 grav. hors texte. Chaque vol., broché, 1 fr.; relié toile . . 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée. . . . . 4 fr. 50

Bibliothèque Larousse

LITTÉRATURE (Suite)

Stendhal : Le Rouge et le Noir. Avec introduction et notes, par C. STRYIENSKI. *Deux volumes.* 4 gravures hors texte. Chaque vol., br., **1** fr. ; rel. t. **1 fr. 30**

En *un seul volume,* reliure demi-peau, tête dorée. . . . . **4 fr. 50**

Balzac : Œuvres choisies illustrées. *Huit volumes* illustrés de 7 gravures et 2 autographes (*Le Père Goriot*, 1 vol. ; *Eugénie Grandet*, 1 vol. ; *La Cousine Bette*, 2 vol. ; *Le Cousin Pons,* 1 vol. ; *Le Lys dans la vallée*, 1 vol. ; *Le Médecin de campagne*, 1 vol. ; *La Peau de chagrin*, 1 vol.). Chaque volume, broché, **1** fr. ; relié toile. . **1 fr. 30**

Les huit volumes reliés toile, sous étui. . . . . **11 francs**

En *trois volumes,* reliure demi-peau, tête dorée. . . . . **16 fr. 50**


VICTOR HUGO

Musset : Œuvres complètes illustrées. *Huit volumes* illustrés de 7 gravures et 2 autographes (*Poésies*, 2 vol. ; *Comédies et Proverbes*, 3 vol., *Confession d'un enfant du siècle*, 1 vol. ; *Contes*, 1 vol. ; *Nouvelles*, 1 vol.). Chaque vol., br. . . **1 franc**
Relié toile. . . . . **1 fr. 30**

Les huit volumes reliés toile, sous étui . . . . **11 francs**

En *trois volumes*, reliure demi-peau, tête dorée. . . . . . . **16 fr. 50**

Victor Hugo : Œuvres choisies illustrées. Avec biographie et notices, par LÉOPOLD-LACOUR, agrégé de l'Université, et préface de Gustave SIMON. *Deux volumes* d'environ 550 pages chacun, 60 gravures dont 48 hors texte (*Poésie*, 1 vol. ; *Prose*, 1 vol.). Chaque vol., br., **5** fr. ; relié toile, **6** fr. ; demi-peau . . . **8 francs**

Anthologie des écrivains français du XVIIe siècle. Avec biographies et notes, par GAUTHIER-FERRIÈRES. *Deux volumes* (*Poésie*, 1 vol. ; *Prose*, 1 vol.), 45 portraits dont 8 hors texte, 51 autographes. Chaque volume, broché, **1** fr. ; relié toile. . . . . **1 fr. 30**

En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . **4 fr. 50**

Anthologie des écrivains français du XVIIIe siècle. Avec biographies et notes, par GAUTHIER-FERRIÈRES. *Deux volumes* (*Poésie*, 1 vol. ; *Prose*, 1 vol.). 61 portr., dont 8 hors texte, 56 autogr. Chaque vol., br., **1** fr. ; rel. t. . **1 fr. 30**

En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée . . . . **4 fr. 50**

Bibliothèque Larousse

LITTÉRATURE (Suite)

Anthologie des écrivains français du XIXe siècle. Avec biographies et notes, par GAUTHIER-FERRIÈRES. *Quatre volumes* (*Poésie*, 2 vol.; *Prose*, 2 vol.). 89 portr., dont 16 hors texte, 83 autogr. Chaque vol., br., 1 fr.; rel. t. 1 fr. 30
En *un seul volume*, reliure demi-peau, tête dorée. . . . . 7 francs

2° *Études littéraires.* — Conçus sur un plan uniforme, les volumes ci-dessous comportent, avec la vie des écrivains, l'étude de leur œuvre accompagnée d'extraits caractéristiques.

Montaigne, par L. COQUELIN. 6 grav. Br., 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05
Musset, par GAUTHIER-FERRIÈRES. 4 grav. Br., 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05
Daudet, par P. et V. MARGUERITTE, etc. 8 gr. Br., 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05
Schiller, par Ch. SIMOND. 4 gravures. Broché, 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05
Gœthe, par Ch. SIMOND. 4 gravures. Broché, 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05
Heine, par A. TOPIN. 4 gravures. Broché, 1 fr.; relié toile . . . . . 1 fr. 30
Tolstoï, par OSSIP-LOURIÉ. 4 gravures. Broché, 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05
Ibsen, par OSSIP-LOURIÉ. 4 gravures. Broché, 0 fr. 75; relié toile. 1 fr. 05

3° *Histoire de la Littérature.* — Cette section mettra à la disposition du public, sous une forme peu coûteuse, d'excellents précis des diverses littératures.

La Littérature française au XIXe siècle, par Ch. LE GOFFIC. 76 gravures, Broché, 1 fr. 75; relié toile. . . . . 2 fr. 25
Littérature anglaise, par W. THOMAS. 56 gr. Br., 1 fr. 20; rel. t. 1 fr. 50
Littérature italienne, par G.-M. GATTI. 23 gr. Br., 1 fr.; rel. toile. 1 fr. 30
Histoire de la Littérature russe, par L. LEGER, membre de l'Institut. 26 gravures, 5 autographes. Broché, 0 fr. 75; relié toile . . . . 1 fr. 05
Anthologie des écrivains suédois contemporains, par T. HAMMAR. 4 grav. hors texte. Broché, 1 fr.; relié toile . . . . 1 fr. 30

BEAUX-ARTS

Anthologie d'Art français : XIXe siècle (Peinture), par Ch. SAUNIER. *Deux volumes* contenant 240 reproductions photographiques en pleine page. Chaque volume, broché, 2 fr. 50; relié toile . . . . 3 fr. 50
Édition de luxe sur papier mat, chaque volume, broché. . . . . . 5 francs
Anthologie d'Art français : XXe siècle (Peinture), par Ch. SAUNIER. 128 reproductions photographiques en pleine page. Broché, 3 fr. 50; rel. toile. 4 fr. 50
Édition de luxe sur papier mat, broché . . . . 6 francs
Rembrandt, par A. BRÉAL. 24 gr. hors texte. Br., 1 fr. 20; rel. toile. 1 fr. 50
L'Art à l'Ecole, par Ch.-M. COUYBA et les membres du Comité de la Société française de l'Art à l'Ecole. 70 grav. Broché, 1 fr. 20; relié toile. . . . 1 fr. 50

HISTOIRE ET GÉOGRAPHIE

Histoire de Russie, par L. LEGER. 12 gr., 2 cartes. Br., 0 fr. 75; rel. 1 fr. 05
Géographie rapide de l'Europe, par Onésime RECLUS. 16 gravures, 1 carte. Broché, 1 fr. 20; relié toile. . . . . 1 fr. 50
Géographie rapide de la France, par RECLUS. 18 gr. Br., 1 fr. 20; rel. 1 fr. 50

Toute commande d'au moins 25 fr. peut être payée à raison de 5 fr. par mois.

Bibliothèque Larousse

AGRICULTURE

Routine et progrès en agriculture, p. DUMONT. 92 gr. Br., **1** fr. **80**; rel. **2** fr. **25**

Le Jardin de l'instituteur, de l'ouvrier et de l'amateur, par P. BERTRAND. Manuel pratique de jardinage. 60 grav. et 9 pl. Br., **1** fr. **20**; rel. t. **1** fr. **50**

Le Verger de l'instituteur, de l'ouvrier et de l'amateur, par P. BERTRAND. 193 gravures. Broché, **1** fr. **20**; relié toile. . . . . **1** fr. **50**

Le Bétail, par Marcel VACHER. 10 grav. Br., **0** fr. **75**; relié toile . . **1** fr. **15**

Le Porc, par Marcel VACHER. 10 gravures. Br., **0** fr. **75**; rel. toile. **1** fr. **15**

Toute la Basse-Cour, par H. VOITELLIER. 11 gr., 24 pl. Br., **1** fr. **50**; cart. **1** fr. **95**

Améliorations du sol, par M. ABADIE. 95 gr. Br., **0** fr. **90**; relié toile. **1** fr. **20**

Des fourrages verts toute l'année, p. COMPAIN. 44 gr. Br., **0** fr. **90**; rel. **1** fr. **20**

CONNAISSANCES PRATIQUES

Défends ton argent, par G. SOREPH. 4 gr. Br., **0** fr. **90**; rel. toile. **1** fr. **20**

La Cuisine à bon marché, par Mme J. SÉVRETTE. Br., **0** fr. **90**; rel. **1** fr. **20**

La Nourriture de l'Enfance, par le Dr H. LEGRAND. Br., **1** fr. **20**; rel. **1** fr. **50**

Champignons mortels et dangereux, par F. GUÉGUEN, professeur agrégé à l'Ecole supérieure de Pharmacie. 7 planches en couleurs. Relié toile. **1** fr. **50**

Le Guide mondain, par la Ctesse DE MAGALLON. Br., **0** fr. **90**; rel. toile **1** fr. **20**

Le Passe-temps des mois, par DELOSIÈRE. 111 grav. Br., **0** fr. **75**; rel. **1** fr. **05**

La Maison fleurie, par F. FAIDEAU. 61 grav. Br., **0** fr. **90**; rel. toile. **1** fr. **20**

Les Habitations à bon marché et un art nouveau pour le peuple, par Jean LAHOR. 39 gravures. Broché, **2** fr.; relié toile. . . . . **2** fr. **30**

Le Dessin de l'artisan et de l'ouvrier, p. CHEVRIER. Br., **0** fr. **75**; r. **1** fr. **05**

Pour former un tireur, par VIOLET et VOULQUIN. Br., **0** fr. **75**; rel. t. **1** fr. **05**

Frontières françaises, forts, camps retranchés, par G. VOULQUIN. *Trois vol.* illustrés de nombreuses grav. et cartes. Chaque vol., br., **1** fr. **20**; rel. **1** fr. **50**

SPORTS

Le Lawn-tennis, le Golf, le Croquet, le Polo, par P. CHAMP, F. DE BELLET, A. DESPRÉS, F. CAZE de CAUMONT. 50 grav. dont 24 hors texte. Rel. t. **2** francs

Les Sports nautiques : *Aviron, Natation, Water-polo*, par Louis DOYEN, Paul AUGÉ et Georges MOËBS. 41 gravures dont 24 hors texte. Relié toile. . **2** francs

La Boxe : *Boxe anglaise et française, lutte*, par J. MOREAU, CHARLEMONT, LUSCIEZ et DERIAZ. 48 gravures. Relié toile. . . . . **2** francs

L'Escrime : *Fleuret, Epée, Sabre,* par KIRCHHOFFER, J. JOSEPH-RENAUD et Léon LECUYER. 48 gravures dont 38 hors texte. Relié toile . . . . . . **1** fr. **30**

La Chasse à tir au chien d'arrêt et la chasse au gibier d'eau, par GASTINNE-RENETTE, P. BERT, Cte J. CLARY, VOULQUIN, etc. 128 gr. Relié t. **2** francs

Jeux et concours de plein air à la campagne, à la mer, à l'école, par le Baron GUSTAVE. 60 gravures dont 32 hors texte. Relié toile. . . . . **2** francs

Bibliothèque rurale

Les ouvrages qui composent cette collection ont un caractère essentiellement pratique. Dépouillés autant que possible de tout langage scientifique, ils exposent sous une forme simple et accessible tout ce qu'il est utile de savoir pour réussir aujourd'hui dans les diverses branches des travaux agricoles. Imprimés et illustrés avec soin, et d'un prix très modéré, ils ont leur place marquée dans la bibliothèque de tous les cultivateurs, propriétaires, etc. (*Collection honorée de nombreuses souscriptions des ministères de l'Agriculture et de l'Instruction publique.*)

L'Agriculture moderne, encyclopédie de l'agriculteur, par V. SÉBASTIAN, chimiste agronome. 560 pages, 671 gravures. Broché, 5 fr.; relié toile. **6 fr. 50**

La Ferme moderne, traité des constructions rurales, par ABADIE, professeur de génie rural à l'Ecole nat. d'agric. de Rennes. 390 gr. Br., 3 fr.; rel. t. **4 francs**

Prairies et Pâturages (Praticulture moderne), par COMPAIN, chef des cultures à l'Ecole nationale d'agriculture de Rennes. 181 grav. Br., 3 fr.; rel. t. **4 francs**

Rotations et assolements, par PARISOT, professeur à l'Ecole nationale d'agriculture de Rennes. Broché, 2 fr.; relié toile . . . . **3 francs**

La Culture profonde et les améliorations foncières, par R. DUMONT, professeur spécial d'agriculture. 33 grav. Broché, 1 fr. 50; relié toile. **2 fr. 25**

Les Sols humides, par R. DUMONT. 52 grav. Br., 2 fr.; relié toile. **3 francs**

Les Industries de la ferme, par LARBALÉTRIER. 161 gr. Br., 2 fr.; rel. **3 francs**

L'Outillage agricole, par DE GRAFFIGNY. 240 gr. Br., 2 fr.; rel. t. **3 francs**

Élevage en grand de la volaille, par PALMER. Br., 1 fr. 50; rel. **2 fr. 25**

La Basse-Cour, par TRONCET et TAINTURIER. 80 grav. Br., 2 fr.; rel. **3 francs**

Le Bétail, par TRONCET et TAINTURIER. 100 grav. Br., 2 fr.; relié . **3 francs**

La Médecine vétérinaire à la ferme, par le Dr G. MOUSSU, professeur à l'Ecole d'Alfort. 85 gravures. Broché, 3 fr.; relié toile . . . . **4 francs**

La Laiterie moderne, par WAUTERS et Mme HAENTJENS. 75 gravures. Broché, 2 fr.; relié toile. . . . . **3 francs**

L'Arboriculture fruitière en images, par VERCIER, professeur spécial d'horticulture. 101 planches constituant un véritable enseignement par l'image, avec texte explicatif en regard. Broché, 3 fr.; relié toile. . . . . . . **4 francs**

L'Arboriculture pratique, par TRONCET et DELIÈGE. Br., 2 fr.; rel. **3 francs**

La Viticulture moderne, par G. DE DUBOR. 100 gr. Br., 2 fr.; rel. t. **3 francs**

Le Pommier à cidre et les meilleurs fruits de pressoir, par E. FAU, prof. spécial d'agriculture. 30 gr. et 32 planches hors texte. Br., 2 fr.; rel. t. **3 francs**

L'Apiculture moderne, par CLÉMENT, vice-président de la Société centrale d'apiculture. 153 gravures. Broché, 2 fr.; relié toile . . . . **3 francs**

Le Jardin potager, par TRONCET. 190 grav. Br., 2 fr.; relié toile. **3 francs**

Le Jardin d'agrément, par TRONCET. 150 grav. Br., 2 fr.; relié . **3 francs**

Comptabilité agricole, par BARILLOT. Broché, 2 fr.; relié toile. . **3 francs**

Les Animaux de France, utiles et nuisibles, par CLÉMENT et TRONCET. 160 gravures. Broché, 2 fr.; relié toile . . . . **3 francs**

Destruction des insectes et autres animaux nuisibles, par A.-L. CLÉMENT. 400 gravures. Broché, 2 fr.; relié toile. . . . . **3 francs**

Ecoles et cours d'Agriculture, par DUGUAY. 39 gravures. Br. . **1 franc**

Envoi franco au reçu d'un mandat-poste.

Dictionnaires divers

Dictionnaire usuel de Droit, par Max LEGRAND, avocat. Un volume in-8° de 840 pages, 15 gravures et 3 cartes. 10e mille. Broché . . . . **7 fr. 50**
Relié toile. . . . . **9 francs**
Supplément. 144 pages. Broché . . . . **3 francs**

Rédigé dans un esprit essentiellement pratique, ce dictionnaire met à la portée de tous ce qu'il peut être utile de savoir en matière juridique, sous une forme aussi claire et accessible que possible, et l'ordre alphabétique en rend en outre la consultation infiniment plus commode que celle d'un code. Il est superflu d'insister sur les services qu'un ouvrage ainsi conçu peut rendre à chacun dans la conduite de ses affaires : ce sera en particulier un guide des plus précieux toutes les fois qu'on aura un contrat à passer, un procès à intenter ou à soutenir, ou simplement quelque formalité administrative ou judiciaire à remplir. Un appendice placé à la fin du volume donne la formule d'un certain nombre d'actes d'une application courante : reconnaissances, procurations, baux, etc. (*Demander le prospectus spécimen.*)

Dictionnaire analogique de la langue française, par P. BOISSIÈRE. Répertoire complet des mots par les idées et des idées par les mots. 10e édition, augmentée d'un *Complément.* Un volume gr. in-8° de 1 500 pages. Broché . . . . **25 francs**
Relié toile, **28** fr. ; demi-chagrin. . . . . **30 francs**

Par un système d'analogie très ingénieux, cet ouvrage permet de trouver sur-le-champ le terme propre qui répond à une idée quelconque et suggère, peut-on dire, les expressions dont on a besoin. On voit quels services il peut rendre à tous ceux qui ont à écrire en français. (*Demander le prospectus spécimen.*)

Dictionnaire synoptique d'étymologie française, par H. STAPPERS, donnant la dérivation des mots usuels, classés sous leur racine commune et en divers groupes : latin, grec, langues germaniques, etc. Un volume in-12 de 960 pages. 6e édition. Relié toile . . . . **6 francs**

Dans ce livre on trouvera, groupés d'une façon méthodique, tous les mots de la langue française de même provenance, qui, dans les autres dictionnaires, se trouvent forcément éparpillés d'après l'ordre alphabétique. On comprend quel intérêt présente cet ouvrage, tant au point de vue des recherches étymologiques qu'au point de vue de l'étude des mots. (*Demander le prospectus spécimen.*)

Vocabulaire synthétique de la langue française, par L. GRIMBLOT. Un fort volume in-12, illustré de 4 500 gravures. Broché. . . . . **10 francs**
Relié toile. . . . . **12 francs**

Cet ouvrage permettra de se livrer à une étude approfondie du vocabulaire. On y trouvera les mots-racines des diverses provenances groupés avec leurs dérivés autour de l'idée à laquelle ils se rapportent.

Dictionnaire méthodique et pratique des rimes françaises, précédé d'un traité de versification, par Ph. MARTINON. Un volume petit in-12 de 300 pages. 4e édition. Relié toile. . . . . **2 fr. 50**

Ce dictionnaire offre des avantages considérables sur tous les ouvrages similaires. Outre que sa nouveauté le met au courant des derniers enrichissements de la langue, il se recommande par l'originalité de son plan, grâce auquel les rimes sont présentées d'une façon particulièrement pratique. (*Demander le prospectus spécimen.*)

Envoi franco au reçu d'un mandat-poste.

Ouvrages de vulgarisation

La Photographie, guide du photographe amateur, par Henri DESMAREST. Un vol. in-12, 65 gravures. 6e édition. Broché, **1** fr. **25**; relié toile. . **2** francs

Dans ce guide, dépourvu de formules chimiques trop compliquées, l'amateur trouvera, résumées d'une façon simple et pratique, toutes les opérations et manipulations photographiques.

Le Naturaliste amateur, petit guide pratique, par M. MAINDRON. Botanique, Zoologie, Minéralogie, Géologie. Un vol. in-8°, 166 grav. 2e éd. Br. . **3** francs

Cet ouvrage contient une foule de renseignements pratiques sur la manière d'excursionner, sur l'outillage, sur la confection des herbiers, sur la chasse des insectes, des papillons, des coléoptères, l'empaillage des oiseaux, l'étude des fossiles, etc.

Herbier classique, par F. FAIDEAU. **50 plantes caractéristiques des principales familles analysées et décrites.** Un vol. in-8°, 140 pages, 162 grav. Br. **2 fr. 25**
Relié toile . . . . **3** francs

Cet ouvrage renferme la description de 50 plantes choisies parmi les plus communes de nos champs et de nos bois, et dont chacune représente le type d'une famille botanique. On a évité autant que possible les termes techniques et on a joint au texte une double illustration : reproductions photographiques donnant la physionomie d'ensemble de chacune des 50 plantes étudiées, et dessins d'après nature montrant les détails que la photographie ne peut reproduire.

Expériences et Manipulations, par J.-F. BOIS. *Tome Ier*: Chimie, Physique, Mécanique; 750 expériences. Un vol. in-8°, 350 pages, 150 gravures. 4e éd. Broché . . . . **4** francs
Tome II: Botanique, Zoologie, Géologie, Minéralogie, Agriculture, Hygiène; 260 expériences. Un vol. in-8°, 192 pages, 92 grav. 2e édition. Broché. **2 fr. 50**

Les expériences indiquées dans ces deux volumes sont généralement simples. Toutes ont été exécutées sous la direction de l'auteur et rédigées après le résultat constaté, de sorte qu'elles sont présentées avec la sanction de la pratique.

Météorologie usuelle, par J. CHAUMEIL. Un volume in-12, 55 gravures et cartes. Broché. . . . . **1 fr. 50**

Cet ouvrage expose clairement ce qu'on peut dire, en l'état actuel de la science, de précis et de vraiment pratique pour la prévision du temps.

Récréations mathématiques, par J. VINOT. Questions curieuses et utiles sur les sciences. Un vol. in-8°, 6e édition. Br., **3** fr.; relié toile . . . . **3 fr. 75**

A côté de problèmes dont chacun constitue ce qu'on appelle vulgairement un *tour* de calcul ou de cartes, on trouvera dans ce volume une foule de notions d'un réel intérêt scientifique, notamment des moyens fort ingénieux pour abréger les longues opérations d'arithmétique, des détails sur les propriétés des nombres, les carrés magiques, etc.

Un Tour du Monde (octobre 1908-juillet 1909), par O.-M. LANNELONGUE. Un vol. in-8°, 350 pages, 112 reproductions photographiques. Broché. **6** francs
Relié toile . . . . **7 fr. 50**

Cet ouvrage n'offre pas seulement au lecteur un très attrayant récit de voyage; on y trouvera encore d'intéressantes considérations politiques, sociales, scientifiques, etc.

L'Art, simples entretiens à l'usage de la jeunesse, par E. PÉCAUT et Ch. BAUDE. Un vol. in-8°, 240 pages, 125 gravures. 11e édition. Broché . . . . . . **2** francs
Cartonné, **2** fr. **50**; relié toile, **3** fr.; tranches dorées. . . . . **4** francs

Toute l'histoire de l'art est passée en revue dans cet ouvrage; les auteurs ont fait un choix judicieux des chefs-d'œuvre les plus caractéristiques des différentes époques, et chacun d'eux est reproduit et commenté par un texte clair et précis.

Envoi franco au reçu d'un mandat-poste.

Paris. — Imp. Larousse (Oct. 1912). — 175 — 20

